
BACHELORARBEIT

Herr
Jeremias Eichler

**Vergleich von Bildparametern
beim Einsatz einer Lichtfeld-
kamera und einem stereosko-
pischen Kamerasystem**

2015

BACHELORARBEIT

Vergleich von Bildparametern beim Einsatz einer Lichtfeldkamera und einem stereoskopischen Kame- rasystem

Autor/in:
Herr Jeremias Eichler

Studiengang:
Medientechnik für Film und Fernsehen

Seminargruppe:
MT10 wF-B

Erstprüfer:
Prof. Alexander Marbach

Zweitprüfer:
B.Eng. / M.A. Constanze Hundt

BACHELOR THESIS

Comparison of image parameters when using a light field camera and a stereoscopic camera system

author:

Herr Jeremias Eichler

course of studies:

Medientechnik für Film und Fernsehen

seminar group:

MT10 wF-B

first examiner:

Prof. Alexander Marbach

second examiner:

B.Eng. / M.A. Constanze Hundt

Bibliografische Angaben

Nachname, Vorname: Eichler, Jeremias

Thema der Bachelorarbeit: Vergleich von Bildparametern beim Einsatz einer Lichtfeldkamera und einem stereoskopischen Kamerasystem

Topic of thesis: Comparison of image parameters when using a light field camera and a stereoscopic camera system

60 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2015

Abstract

The aim of this study is to investigate in technology of stereoscopic film productions. The main schedule of 3d picture generation is to create more authentic movie experience by flooded emotions.

At first will be discussed basics of psychology monocular and binocular vision. At this study current technology of stereoscopic 3d-picture generation is described theoretically and practically explored. Also it is essentially to describe advantages and disadvantages of those technologies.

Furthermore is described the trifocal-rig and light-field camera as a part of 3d-picture generation based on depth maps. Therefore it was investigated an empirical comparison parameters of pictures from 3d-pictures by 3d-rig and light-field camera.

Finally it is discussed the field of application of light-field cameras in 3d-picture generation.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Vorwort	XIII
1 Einleitung.....	1
2 Natürliche Raumwahrnehmung.....	3
2.1 Der Aufbau des menschlichen Auges.....	3
2.2 Neurologische Verarbeitung im Gehirn.....	5
2.3 Monokulare Tiefenwahrnehmung	7
2.3.1 Monokulare Tiefenhinweise.....	8
2.3.2 Monokulare Bewegungshinweise	11
2.4 Binokularsehen	13
3 Stereoskopische Kamerasysteme	17
3.1 Eigenschaften stereoskopische Kamerasysteme	18
3.1.1 Von der Stereobasis über die Parallaxe zur der Disparität	18
3.1.2 Konvergenz, Version und Divergenz	19
3.1.3 Akkomodations-Konvergenz-Diskrepanz.....	19
3.1.4 Key-Stoning und Ghosting	20
3.1.5 Tiefenbudget.....	21
3.1.6 Tiefenschärfe	22
3.2 Rig-Systeme	23
3.2.1 Side-by-Side Rig	23
3.2.2 Spiegelrig.....	24
4 Weiteres 3D-Bild-erzeugendes Kamerasystem	26
4.1.1 Tiefenkarten.....	26
.....	27
4.2 trifocales Kamerasystem	27
.....	28
5 Lichtfeldkamera.....	29

5.1	Lichtfeld	29
5.2	Lichtfeldkamera.....	30
6	Vergleich von Bildparametern beim Einsatz von einer Lichtfeldkamera und einem stereoskopischen Kamerasystem	34
6.1	Erläuterung der zu vergleichenden Bildparameter.....	34
6.2	Erläuterung zusätzlich eingesetzter Technik	36
6.3	Versuchsteile	37
6.3.1	Versuchsvorbereitung Teil 1.....	38
6.3.2	Versuchsdurchführung	40
6.3.3	Versuchsvorbereitung Teil 2.....	46
6.3.4	Versuchsdurchführung	48
6.4	Auswertung der Versuche Teil 1 und Teil 2	49
6.5	Vergleich der 3D-Bilder eines stereoskopischen Spiegelrig und einer Lichtfeldkamera.....	55
7	Schlussbetrachtung.....	59
	Literaturverzeichnis	XI
	Anlagen.....	XV
	Eigenständigkeitserklärung	XVI

Abkürzungsverzeichnis

KEV	Konvergenz-Ebenen-Verschiebung
HIT	Horizontal Image Transfer
SBS	Side-by-Side [Rigbezeichnung]
s3D	Stereo 3D
AKD	Akkomodations-Konvergenz-Diskrepanz
FFA	Filmförderungsanstalt
PNG	portable network graphic
RAW	englisches Wort für "Roh" und bezeichnet unkomprimierte Dateien
TT	Table Top Bezeichnung für Spurgröße einer Modellbahnschiene
TIFF	Tagged Image File Format (eine Form von RAW-Daten)
RGB	Abkürzung für die Grundfarben Rot, Grün und Blau
STAN	stereoscopic analyzer

Formelverzeichnis

$L(u, v, s, t)$	Plenoptische Gleichung	Seite 30
$\frac{aS}{aW} = \frac{lS}{lW}$	Verhältnisgleichung zur Errechnung der Stereobasis	Seite 46
$SB = \frac{lW * \frac{aS}{2}}{f}$	Gleichung zur Errechnung der Stereobasis	Seite 46
$n * \frac{m}{1000} = aS$	Gleichung zur Errechnung der Parallaxe auf dem Sensor	Seite 47
$\frac{n}{c} * 100 = P$	Gleichung zur Errechnung der Parallaxe in %	Seite 47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links: Linse eines Auges; rechts: Linse einer Kamera; Beispiel für Bionik [http://www.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.spektrum.de%2Ffm%2F912%2Fthumbnails%2FS_52_53_Auge_Kamera.jpg.1576887.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.spektrum.de%2Falias%2Fbionik%2Fnach-dem-vorbild-der-na-tur%2F1322712&h=225&w=586&tbnid=7XM_E614esEE2M%3A&zoom=1&docid=jHU7sLHeEP4X5M&ei=bhxXVcmwLon-ygP_6YCgBw&tbn=isch&client=firefox-a&iact=rc&uact=3&dur=85&page=1&start=0&ndsp=29&ved=0CCMQrQMwAQ]

Seite 3

Abbildung 2: schematische Draufsicht auf ein Augapfel [Brandis, Hans-Joachim: „Anatomie und Physiologie. Für Krankenpflegeberufe sowie andere medizinische und pharmazeutische Fachberufe“. 9. Auflage, bearbeitet von Univ.-Professor Dr. Winfried Schöndeberger. Stuttgart, Jena, New York. Urban und Fischer Verlag 1995]

Seite 4

Abbildung 3: schematische Draufsicht der Sehnervenkreuzung [Brandis, Hans-Joachim: „Anatomie und Physiologie. Für Krankenpflegeberufe sowie andere medizinische und pharmazeutische Fachberufe“. 9. Auflage, bearbeitet von Univ.-Professor Dr. Winfried Schöndeberger. Stuttgart, Jena, New York. Urban und Fischer Verlag 1995]

Seite 7

Abbildung 4: Tafelzeichnung als Beispiel monokularer Tiefenhinweise für Linearperspektive

[http://www.google.de/imgres?imgurl=http%3A%2F%2Fwww.allgemeinbildung.ch%2Farb%2Farb%253Dkun%2Fw_Tafelbilder_Perspektive-Fluchtpunkt.jpg&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.allgemeinbildung.ch%2Farb%2Farb%253Dkun%2Fw_Tafelbilder_Perspektive-Fluchtpunkt.htm&h=600&w=800&tbnid=7bRsABeQjgMZJM%3A&zoom=1&docid=KRlpRI8h_4Oh9M&ei=1hIXVYv3FKa4ygPzuoHwBg&tbn=isch&client=firefox-a&iact=rc&uact=3&dur=148&page=1&start=0&ndsp=20&ved=0CGGgQrQMwEQ]

Seite 8

Abbildung 5: Innenverkleidung eines Autos als Beispiel für Eigenschatten und Texturdichte [http://forum.cad.de/foren/ubb/uploads/tommie84/20120523_154043.jpg]

Seite 10

Abbildung 6: Beispiel für Atmosphärischer Dunst

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Zimba_Panorama.jpg]

Seite 10

Abbildung 7: Bildausschnitt aus den nachfolgenden Versuchen: Zwei Kameraansichten eines Spiegelrigs übereinander gelegt [Jeremias Eichler]

Seite 14

Abbildung 8: Augenausrichtungen: Die Divergenz ist unnatürlich, wird aber bis zu einem gewissen Maß vom Sehsystem toleriert [<http://mylinux.rmz.uni-lueneburg.de/ws1415/stereo/images/konvergenzdivergenz.jpg>]

Seite 15

Abbildung 9: Schematische Zeichnung von Horopter und Pnaumraum [Holger Tauer, Stereo 3D Grundlagen, Technik und Bildgestaltung]

Seite 16

Abbildung 10 [S3D]: Beispiel für Ghosting im Bild: Besonders an der Innenseite des linken Dinosaurierbeines zu erkennen und an den Baumrändern

Seite 20

Abbildung 11: Beispiel für kleine Tiefenschärfe aus dem Versuch: An dem karierten Untergrund erkennt man wie klein der tatsächlich scharfe Bereich ist [Jeremias Eichler]

Seite 22

Abbildung 12: Beispiel eines SBS-Rig mit zwei Satellitenkameras [http://1.bp.blogspot.com/-PHLcFkcQktk/T9YdSV8oLDI/AAAAAAAAADXE/PqYBS_f6Js8/s1600/Indiecam%20indieGS2K%203D%20rig.jpg]

Seite 24

Abbildung 13: Spiegelrig aus dem Versuch des Fraunhofer-Heinrich-Hertz-Institut [Jeremias Eichler]

Seite 25

Abbildung 14: Beispiel für eine Tiefenkarte aus dem Versuch einer Lichtfeldkamera [Jeremias Eichler]

Seite 27

Abbildung 15: Trifocal-Rig des 3IT in Berlin [Jeremias Eichler]

Seite 28

Abbildung 16: Das trifocal-Rig des 3IT in Berlin [Jeremias Eichler]

Seite 29

Abbildung 17: ausschnitt eines Rohbildes des Mikrolinsengitters mitte: Ein schwarzer Punkt wie er aus der Aufnahme errechnet wurde; links: weit weg fotografiert; rechts: nah fotografiert [LUHMANN, THOMAS; JEPPING, CHRISTIAN & HERD, Benjamin: "Untersuchung zum messtechnischen Genauigkeitspotenzial einer Lichtfeldkamera"]

Seite 31

Abbildung 18: Mikrolinsenkalibrierung mit Objektiv; oben: gleiche Blende von Mikrolinse und Optik; mitte: Untersteuerung durch zu kleine Blende der Optik; unten: Übersteuerung durch zu große Blende der optik [Buroh, Dennis „Fourier Slice Photo-

graphy, Im Rahmen des Computer Vision Seminars (WS 10/11)“. Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel]

Seite 32

Abbildung 19: Screenshot eines STAN (Fraunhofer HHI) [3IT Berlin; Florian Krassow]

Seite 37

Abbildung 20 [S3D]: Ausschnitt Szene 1 (Raytrix) [Jeremias Eichler]

Seite 43

Abbildung 21 [S3D]: Ausschnitt Szene 2 (Raytrix) [Jeremias Eichler]

Seite 45

Abbildung 22 [S3D]: Ausschnitt Szene 3 (3IT) [Jeremias Eichler]

Seite 46

Abbildung 23: Bild von bemalten und unbemalten Tischtennisball (Raytrix) [Jeremias Eichler]

Seite 50

Abbildung 24: Tiefenkarte von Abbildung 21: Der unbemalte Ball ist kaum zu erkennen [Jeremias Eichler]

Seite 50

Abbildung 25 [S3D]: Beide Teilbilder liegen übereinander. Es sind kaum Farbdifferenzen im Histogramm zu erkennen [Jeremias Eichler]

Seite 52

Abbildung 1: Beispiel für Artefakt-Bildung: Links unter der Schiene, als auch die Struktur des Untergrundes, weichen stark von der Originalszenerie ab [Jeremias Eichler]

Seite 53

Abbildung 27: Beide Teilbilder (Spiegelrig) im Vergleich zusammengesetzt mit RGB-Abweichung in 50%tiger Transparenz [Jeremias Eichler]

Seite 54

Abbildung 28: Histogramme beider Teilbilder übereinander. Es sind starke Differenzen erkennbar [Jeremias Eichler]

Seite 54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erläuterung der zu untersuchenden Parameter.....	35
Tabelle 2: Messdaten Szene 1 (Raytrix).....	43
Tabelle 3: Messdaten Szene 2 (Raytrix).....	44
Tabelle 4: Messdaten Szene 3 (Raytrix).....	46
Tabelle 5: Abweichungen der drei Versuchsszenen im 3IT Berlin; gemessen von STAN	49
Tabelle 6: Gegenüberstellung der untersuchten Parameter.....	57

Vorwort

Mit dem Wunsch 3D-Bilder noch authentischer erscheinen zu lassen und den Rezipienten ein noch eindrucksvolleres Filmerlebnis darzubieten, befasst sich diese Arbeit mit der aktuellen Technik welche in stereoskopischen Filmproduktionen eingesetzt wird und welcher, die gegebenenfalls in Zukunft eine Rolle spielen könnten. Es wird vorausgesetzt, dass das Grundwissen überameratechnik und damit einhergehende Erscheinungsbilder dem Leser bekannt sind. Die Grundlagen über Sensortypen und –arten, sowie über optische Bauelemente werden nicht vollständig erläutert.

Der Arbeit ist eine Rot-Cyan-Anaglyphbrille beigelegt. Verschiedene Bilder, besonders ab Kapitel 5, Haben die Kennzeichnung „[S3D]“ in der Abbildungsbezeichnung. Diese Bilder können mit der 3D-Brille betrachtet werden.

Zur besseren Beurteilung des dreidimensionalen Raumwirkung, sind alle Abbildungen nochmals auf der beiliegenden DVD zu finden. Sie sind mit der jeweiligen Abbildungsnummer aus der Arbeit bezeichnet.

Ich möchte mich bei allen Beteiligten und Unterstützern meiner Arbeit recht herzlich bedanken. Besonderer Dank gilt Christian Perwaß und Christian Heinze, welche mir ermöglichten die Untersuchungen in Kiel durchzuführen. Gleichmaßen möchte ich mich bei Florian Krassow und dem 3IT Berlin bedanken. Alle genannten Personen haben es mir erst möglich gemacht eine derart umfangreiche Untersuchung durchzuführen. Ebenso bedanke ich mich bei den Betreuern meiner Hochschule Constanze Hundt und Herr Alexander Marbach, welche mich während der Arbeit stets beraten und unterstützt haben.

Weiterhin möchte ich mich auch bei alle den Bedanken, die mit Rat und Beistand mich durch die Zeit der Erarbeitung begleitet haben. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle die Unterstützung von Susanne Wengler und Lydia Eichler, sowie meiner gesamten Familie.

1 Einleitung

Nebel, Rauch, brennende Häuser und Gewehrsalven – solche Szenen bannen Millionen von Menschen direkt in das Geschehen eines Films. Die Zuschauer betrachten eine fiktiv dargestellte Welt in der Konflikte, Diskussionen oder auch überwältigende emotionale Momente, die ihn mitreisen sollen. Aber sollten solche Handlungen den Betrachter nicht zum aktiven Eingreifen anstiften? Er ist sich währenddessen stets bewusst, dass er lediglich als Außenstehender das Geschehen betrachtet. Daher versucht er nicht einzuschreiten. Er gleicht die fiktiv dargestellte Welt mit seinen Alltagserfahrungen ab. So entwickeln sich Emotionen. Der Zuschauer taucht in diese fiktive Welt ein und lässt sich mitreißen. Die Emotionen können durch den 3D-Effekt verstärkt werden – die Zuschauenden sind in gewisser Weise „im Film“. Das Geschehen ereignet sich nicht nur vor ihren Augen, sondern um sie herum. Mit 3D-Filmen wird damit eine weitere Dimension beschritten, die dem Zuschauer die Verknüpfung zum Alltag erleichtert. Bewegungen, Gesichter und Szenarien können noch wirkungsvoller dargestellt werden.

Der 3D-Film ist heute keine Neuheit mehr. Es wurde schon oft versucht ihn an den Rezipienten heranzutragen. Die technischen Bedingungen waren schlecht, die Produktionskosten zu teuer und die Erwartungshaltung der Kinobesucher zu hoch. Bis auf einen kleinen Boom Anfang der 1950er Jahre, welcher schnell wieder erlosch, brauchte es für den Durchbruch des 3D-Films noch bis zur Digitalisierung der Kinos und Produktionsworkflows. 2010 läutete der Film 'Avatar' von James Cameron dann endlich den lang ersehnten 3D-Kino-Hype ein. Mit mehr als drei Milliarden Dollar Einspielergebnissen wurde klar, welcher kommerziellen Erfolg 3D-Kinofilme ermöglichen¹.

289 Mio. Euro Einnahmen und einen Marktanteil von 22 Prozent aller Kinospielefilme (2D und 3D) prägte der 3D-Film im Jahre 2013 nach Statistiken der Filmförderungsanstalt (FFA). Gezählt wurden dabei nur deutsche Besucher ab einem Alter von 10 Jahren².

Bis heute sind die technischen Bildakquisitionssysteme für stereoskopische Bildaufnahmen nicht fehlerfrei. Technische Baulöcher, Einflüsse von Licht und Wetter, geometrische Verzerrungen oder auch der technische und personelle Aufwand werden

¹ Vgl. Wegener, Claudia; Jockenhövel, Jeskou.a.: „3D-Kino – Studien zur Rezeption und Akzeptanz“, Springer VS, Wiesbaden 2012 Seite 13, 21-37

² Vgl. Filmförderungsanstalt - German Federal Film Board: „Kinobesucher von 3D-Filmen 2013 Strukturen und Entwicklungen auf Basis des GfK Panels“, August 2014, Seite 12-16

ständig untersucht und verbessert. Besonders im Nahbereich und unter schlechten Licht- und Platzbedingungen sind kaum Alternativlösungen zu finden.

In Industrie und Medizin setzten sich mehr und mehr sogenannte Lichtfeldkameras zur Mikroskopie und Laufbandüberwachung durch. Dank sehr exakter Tiefenschätzungen werden mit solchen Kameras Aufzeichnungsmethoden für drei Dimensionen möglich. Durch die Produktion von Mikrolinsen und der heutigen Rechenleistung findet die schon seit über 150 Jahren bekannte Erkenntnis über Lichtfelder nun die Anwendung in der Technik.

Diese Arbeit widmet sich den Problematiken und der Untersuchung, ob ein neuartiges Kamerasystem, die Lichtfeldkamera, in der stereoskopischen Medienproduktionslandschaft eine Alternative darstellen und Fehlerquellen reduzieren oder gar ausschließen kann.

Zunächst wird der Gedanke der Bionik aufgegriffen und die optimierten Strukturen und Prozesse der menschlichen visuellen Wahrnehmung beschrieben, welche die Grundlagen für das technische Verständnis für stereoskopische Filmproduktionen bilden. Besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der neurologischen Verarbeitung von Bildinformationen. Darauf folgend werden aktuelle Bildakquisitionssysteme zur Herstellung von stereoskopischen Bildmaterial (s3D)- Bildmaterial beleuchtet und anhand diverser Parameter technische Grenzen und Fehlerpotential erkundet. Mittels empirischer Untersuchungen und einer statistischen Befragung der praktizierenden Fachwelt werden die aufgestellten Thesen auf deren Relevanz untersucht. Das darauffolgende Kapitel beschäftigt sich mit Lichtfeldkameras, deren Aufbau, besondere Funktionsweise und den daraus resultierenden aktuellen Einsatzgebieten. Der Einsatz der Lichtfeldkamera für die Produktion von 3D-Bildmaterial wird theoretisch untersucht und experimentell nachgewiesen. Die stereoskopischen Aufnahmen und die Aufnahmen von Lichtfeldkameras werden in Hinblick auf stereoskopische Bildparameter theoretisch verglichen und ebenso mittels diverser experimenteller Untersuchungen dargestellt. Zusammenfassend werden die Einsatzmöglichkeiten von Lichtfeldkameras und stereoskopischen Kamerasystemen in der 3D-Filmproduktion bewertet und mögliche Entwicklungspotentiale genannt.

2 Natürliche Raumwahrnehmung



Abbildung 2: links: Linse eines Auges; rechts: Linse einer Kamera; Beispiel für Bionik

In vielen technischen Bereichen machen wir uns Erkenntnisse aus der natürlichen Umwelt zunutze. Dieses wissenschaftliche Prinzip wird als Bionik bezeichnet. Beispielsweise wurde die Konstruktion von U-Booten beim Auf- und Abtauchen an dem der Fische orientiert; das Ortungssystem von Sonaren oder Echoloten, an dem der Delfine^{3 4}; die Bilderzeugung einer Kamera orientiert sich an der Funktionsweise des menschlichen Auges. Der Mensch ist ausgestattet mit einem binokularen Sehsystem, welches ihm das räumliche Sehen und somit die Tiefeneinschätzung ermöglicht. Nachfolgend werden der Aufbau des menschlichen Auges sowie die neurologische Verarbeitung von Bildinformationen im Gehirn betrachtet. Insbesondere werden die binokulare und monokulare Sehfunktion hinsichtlich der Tiefen- und Bewegungswahrnehmung verglichen, da diese maßgeblich für Tiefen- und Bewegungssimulation in 3D-Filmen ist.

2.1 Der Aufbau des menschlichen Auges

Das Auge ist ein wichtiges Sinnesorgan zur Orientierung im Raum. Über zehn Millionen Informationen werden pro Sekunde vom Auge aufgenommen⁵. Der gesamte Augapfel ist von einer Lederhaut umschlossen, welche zur Augenöffnung hin in eine transparente Hornhaut übergeht. Hinter dieser Hornhaut befinden sich, von Kammerwasser umschlossen, die Regenbogenhaut, die Linse und die Pupille, welche gemeinsam als eine Art Objektiv agieren. Die Regenbogenhaut hat mittig eine Öffnung,

³ Vgl. Speck, Thomas: Bionik. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/bionik/8744> (Stand: 03.04.2015)

⁴ Vgl. Werner, Nachtigal: Bionik - Ein Grenzgebiet zwischen Technik und Biologie (Stand: 03.04.2015)

⁵ Vgl. Wesermann, Wolfgang: Das Auge – eine Hochleistungskamera (Stand 05.04.2015)

welche die Pupille darstellt. Durch Weiten und Verkleinern der Regenbogenhaut wird die Pupille größer oder kleiner. So wird der Lichteinfall reguliert [Abbildung 2]. Die Linse bündelt das Licht und wirft es verkehrt herum auf die Netzhaut. Dies geschieht durch den Linseneffekt. Das Gehirn dreht bei der Auswertung das Bild wieder richtig herum.

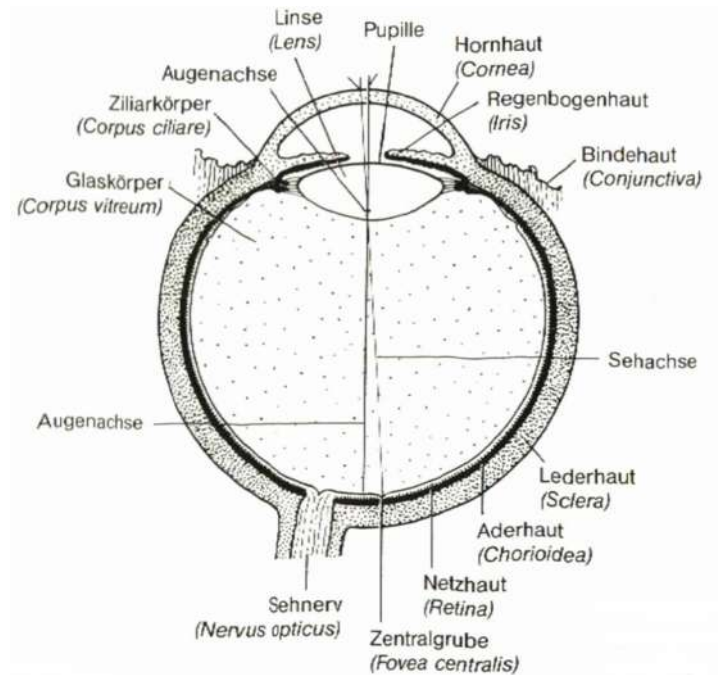


Abbildung 3: schematischer Schnitt durch ein Augapfel

Die Linse ist mit dem Ziliarmuskel verbunden, welcher die Linse stauchen und strecken kann. Somit kann die Brechkraft der Linse verändert werden. Dies ist notwendig um weit entfernte Objekte oder aber auch nahe Objekte entsprechend scharf zu stellen. Diese Fähigkeit zur Akkommodation nimmt mit steigendem Alter ab, da die Linse sich versteift (Alterssichtigkeit). Die Versteifung der Linse beginnt bereits ab 10 Jahren^{6 7}. Ebenso dient der Ziliarmuskel zur Produktion von Kammerwasser, welches das Auge mit Nährstoffen versorgt.

Die Netzhaut ist unser "Sensor", welcher einfallendes Licht in elektrische Signale umwandelt. Dies geschieht durch Stäbchen und Zapfen. Dabei sind im weitesten Sinne Stäbchen für Hell-Dunkel-Sehen und Zapfen für das Farbsehen verantwortlich. Die Zapfen unterteilen sich hinsichtlich der Reizsensibilität in rot-, grün- und blauempfindli-

6 Vgl. Schweizer Optikerverband (kein Autor angegeben): Das Auge. URL: <http://www.sov.ch/de/dokumentation/das-auge> (Stand: 05.04.2015)

7 Vgl. Schweizer Optikerverband (kein Autor angegeben): Das Sehen. URL: <http://www.sov.ch/de/dokumentation/das-sehen> (Stand: 05.04.2015)

che Zapfen. Dabei ist die Verhältnisverteilung der Zapfenarten ein wichtiges Merkmal unseres Sehvermögens. Grünempfindliche Zapfen sind ungefähr in doppelter Häufigkeit vorhanden, wie blau- oder rot-empfindliche Zapfen⁶. Daraus resultiert, dass wir auf Grüntöne weitaus empfindlicher reagieren, als auf andere Farben.

An die Netzhaut schließt der Sehnerv an, welcher für die Reizübermittlung an das Gehirn zuständig ist. Dieser wird als ‚blinder Fleck‘ bezeichnet, an dem wir lichtunempfindlich sind, da weder Zapfen noch Stäbchen in diesem Bereich vorhanden sind. Durch das binokulare Sehsystem des Menschen wird dieser blinde Fleck jedoch ergänzt^{8 9}.

Mittig, direkt hinter der Linse, befindet sich in der Netzhaut eine Vertiefung. Diese Vertiefung wird Fovea genannt¹⁰. Sie hat einen Durchmesser von rund drei Millimetern und besitzt ca. 80.000 Zapfen aller drei Empfindlichkeiten. An diesem Ort entsteht das schärfste Sehen. Alle Informationen, die auf Netzhautbereiche außerhalb der Fovea fallen, liefern uns nur eine reduzierte, unscharfe Umgebungsdarstellung. Allerdings tastet das Auge die Umgebung ab, d.h. Es bleibt nie stehen, sondern ändert ständig in Bruchteilen von Sekunden den Blickpunkt. Dieses Abtasten wird Sakkaden genannt¹¹. Somit wird ein scharfer Eindruck erzeugt. Man könnte sagen, unser Auge tastet das Gesichtsfeld ab, wie ein Fernseher. Der Fernseher tastet von links nach rechts und von oben nach unten systematisch Zeile für Zeile ab. Unser Auge jedoch tastet willkürlich und abhängig von der im Gesichtsfeld ablaufenden Aktion ab, indem in Sakkaden die Konvergenz (siehe Kapitel 2.2) und Akkommodationspunkt immer wieder geändert werden.

2.2 Neurologische Verarbeitung im Gehirn

Beide Augen des menschlichen Sehsystems liefern aus dem aus unserer Umgebung einfallenden Licht gewonnene Informationen. Diese müssen ausgewertet und verarbeitet werden. Hierfür ist in weiten Teilen das Gehirn verantwortlich. Die Verarbeitung der Informationen trägt wesentlich dazu bei, was wir sehen. Besonders der stereoskopische Tiefeneindruck, die Fokussierung und auch die Regulierung des einfallenden

⁸ Vgl. Gutenberg, Johannes: Protokoll zum 4.Kurstag am 30.05.2005 Versuch 4: „Perimetrie“. Universität Mainz (Abgabe der Arbeit: Sommersemester 2005); Seite 1 - 12

⁹ Vgl. Brandis, Hans-Joachim: „Anatomie und Physiologie. Für Krankenpflegeberufe sowie andere medizinische und pharmazeutische Fachberufe“. 9. Auflage, bearbeitet von Univ.-Professor Dr. Winfried Schön-deberger. Stuttgart, Jena, New York. Urban und Fischer Verlag 1995. Seite 461

¹⁰ Vgl. Bochmann, Michael: „Fernkurs zur Vorbereitung auf die amtsärztliche Heilpraktikerprüfung Arbeits- und Lernskript mit naturheilkundlicher Begleittherapie“.

¹¹ Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 12

Licht durch die Regenbogenhaut geschehen durch Reflexe. Die Netzhaut, welche die Informationen in elektrische Signale wandelt, wird als externer Bestandteil des Gehirns betrachtet. Die Rezeptoren, also Stäbchen und Zapfen, werden über sogenannte Ganglienzellen an die Sehnervenbahn angebunden. Nach Holger Tauer sind Ganglienzellen auch Nervenfasern, welche sich außerhalb des Gehirns befinden¹². Diese Ganglienzellen sind in rezeptiven Feldern gebündelt. Im äußeren Netzhautbereich besitzen einzelne Gruppierungen von Stäbchen und Zapfen eine Ganglienzelle zur Übertragung. In der Fovea hingegen ist jeder Zapfen separat mit einer einzelnen Ganglienzelle verbunden. Die Ganglienzellen werden zu Sehnerven, welche zur Sehnervengkreuzung führen. In der Sehnervengkreuzung verschachteln sich die in den Augen empfangenen Informationen. Das Gesichtsfeld lässt sich in den innen liegenden Sehbereich zur Nase hin (nasales Gesichtsfeld) und den äußeren Sehbereich beider Augen (temporales Gesichtsfeld) [Abbildung 3] trennen.

Die nasalen Gesichtsfelder werden jeweils von der eigenen Gehirnhälfte verarbeitet; die temporalen Gesichtsfelder wechseln an der Sehnervengkreuzung zur anderen Gehirnhälfte. Der größte Teil der Nervenfasern gelangt nach einer Umschaltung der Reize in elektrische Signale in das Sehzentrum. Die restlichen Fasern werden in das Mittelhirndach geleitet. Dieses steuert den bereits erwähnten Ziliarmuskel, welcher die Akkommodation herstellt⁸. Beim zweiäugigen Sehen wird durch diesen Reflex ebenfalls die Konvergenzstellung der Augen mitgesteuert, welche ebenfalls zur Scharfstellung des Bildes beiträgt. Vom Hauptsehzentrum werden die Bildsignale anschließend noch zur sekundären Sehrinde weitergeleitet, wo das Bild mit dem optischen Erinnerungsfeld abgeglichen wird. Dies dient der schnelleren Erkennung von Objekten^{7 13}.

¹² Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 14

¹³ Vgl. Karl R. Gegenfurtner, Sebastian Walter und Doris I. Braun: Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn. URL: <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/aka.htm> (Stand: 04.04.2015)

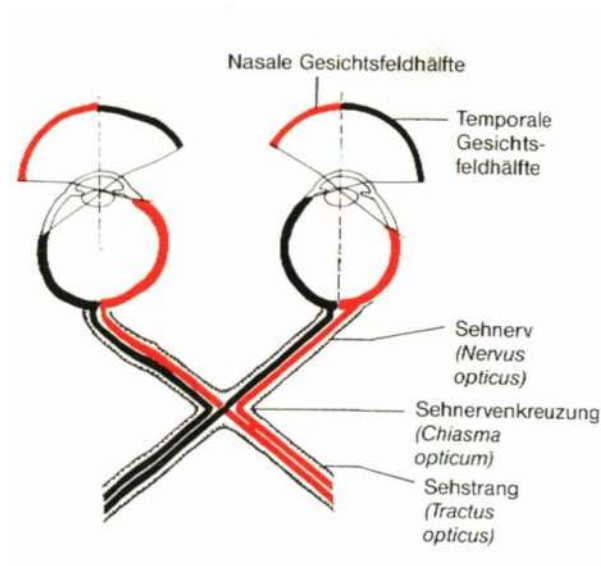


Abbildung 4: schematische Draufsicht der Sehnervenkreuzung

Das Erinnerungsfeld vergleicht Objekte und Formen mit dem was der Betrachter schon gesehen hat und kennt. Somit kann ein Objekt in Bruchteilen von Sekunden erkannt werden. Zusätzlich ist das Erinnerungsfeld die Grundlage für die gestaltpsychologischen Wahrnehmungsgesetze. Diese Wahrnehmungsgesetze definieren, wie die Wahrnehmung des Menschen strukturiert ist. Darunter zählen Gesetze wie Figur und Grund, Gesetz der Ähnlichkeit, Tendenz zur guten Gestalt, Gesetz der Geschlossenheit oder aber auch das Gesetz der Kontinuität. Diese Wahrnehmungsgesetze sind wiederum Grundlagen für verschiedene monokulare Tiefenhinweise¹⁴.

2.3 Monokulare Tiefenwahrnehmung

Monokularsehen [mono (griech.: monos) - einzig; kular (lat.: ocular) - Auge] beschreibt das Sehen mit nur einem Auge¹⁵. Der Mensch sieht im Normalfall binokular mit zwei Augen, wenn er dahingehend nicht gesundheitlich beeinträchtigt ist. Jedoch ergeben sich schon bei monokularem Sehen viele Indikatoren für die Tiefen- und Bewegungswahrnehmung.

Die monokulare Tiefen- und Bewegungswahrnehmung geschieht durch subjektive Beurteilung des Betrachters. Sie ist besonders subjektiv geprägt, da keine absoluten In-

¹⁴ Vgl. Wellhöfer, Peter R.: Grundstudium allgemeine Psychologie. 2. Auflage Stuttgart, Enke 1990. Seiten 65-67

¹⁵ Vgl. Ylvi: <http://www.fremdwort.de/suchen/woerterbuch/monokularsehen>. (Stand: 13.05.2015)

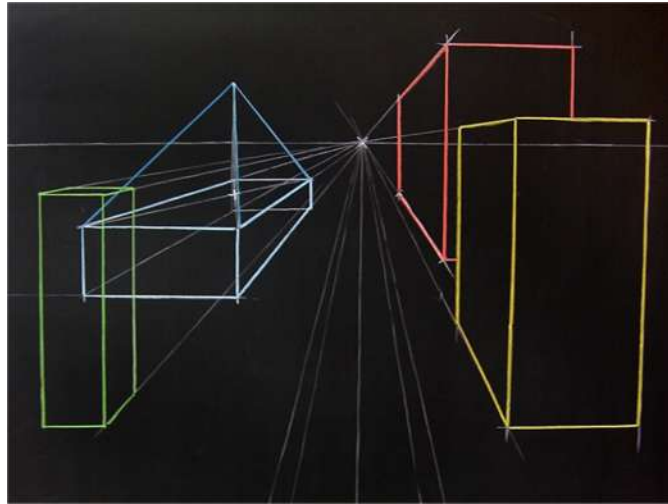


Abbildung 5: Tafelzeichnung als Beispiel monokularer Tiefenhinweise für Linearperspektive

formationen über Tiefe existieren, sondern vielmehr aus den individuellen Erfahrungen des Menschen heraus resultieren. Wir erkennen Tiefen monokular durch logische Schlussfolgerungen aus dem, was wir kennen und alltäglich erleben. Unser Erinnerungsfeld lernt kontinuierlich dazu. Das monokulare Sehen ist sehr einflussreich auf die von uns Menschen wahrgenommene Tiefenwirkung. Das binokulare Sehen dient ergänzend zu feinmotorischen Bewegungen im Raum. Um stereoskopische Raumwirkungen nachbilden zu können, ist das Wissen um die monokulare Tiefenwahrnehmung grundlegend.

2.3.1 Monokulare Tiefenhinweise

Nachfolgend werden die folgenden monokularen Tiefenhinweise, abgeleitet aus den Niederschriften Holger Tauers zusammengestellt und erklärt.

- Linearperspektive
- relative Größe
- Verdeckung
- relative Höhe
- Schatten (Eigenschatten/ Schlagschatten)
- atmosphärischer Dunst
- gewohnte Größen
- Farbperspektive
- Texturdichte

Die Linearperspektive bezeichnet das Phänomen parallel verlaufender Linien, welche in die Tiefe gehen und wirken, als würden sie sich im Fluchtpunkt kreuzen. Sie verlaufen im zweidimensionalen Raum nicht parallel, sondern aufeinander zu. [Abbildung 4].

Gleichgroße Objekte wirken für Betrachtende größer, je näher sie sich an der betrachtenden Person befinden, und kleiner, je näher sie sich an dem Fluchtpunkt befinden. Diese Erfahrung der relativen Größe kann im monokularen Sehen zur Tiefen- und Bewegungswahrnehmung herangezogen werden.

“Wo ein Körper ist, kann kein anderer sein. Körper bestehen aus Materie”¹⁶.

Dieser Grundsatz aus der Physik ist bekannt und bietet einen Teil des Fundaments der Raumwirkung sich verdeckender Körper. Ein Objekt verdeckt hinter sich liegende Objekte und andersherum. Aus dieser physikalischen Erfahrung können wir über die Verdeckung Rückschlüsse auf die Lage von Objekten in der Tiefe ziehen.

Die menschliche Wahrnehmung versucht kontinuierlich die Entfernung aller Objekte im Gesichtsfeld an einer Horizontallinie anzuordnen. Außerhalb von Räumen nutzen wir meistens den Horizont. In Innenräumen können es weit entfernte Horizontallinien wie eine Küchenzeile oder ein Türsturz am Ende eines Flures sein. Je näher ein Objekt an der Horizontallinie ist, desto weiter ist es vom Betrachter entfernt. Tauer fasst diesen Zusammenhang unter dem Begriff der „relativen Höhe“ zusammen.

Der Mensch nutzt Schatten, um Oberflächen von Körpern zu analysieren und deren Position zu ermitteln. Hierfür unterscheidet Holger Tauer zwischen zwei verschiedenen Arten von Schatten. Fällt Licht auf ein Objekt, so werfen Vertiefungen einen Tiefenschatten in Richtung Lichtquelle und Erhöhungen in Richtung des Lichtvektors. [Abbildung 5] Wirft ein Objekt einen Schlagschatten auf seine Umgebung, wird seine Position und Größe im Raum deutlich.

¹⁶ Zitat: Peter R. und Wellhöfer: „Physiolexikon, Physiotherapie von A-Z“.2. Auflage, Enke 1990. Seite 478



Abbildung 6: Innenverkleidung eines Autos als Beispiel für Eigenschatten und Texturdichte

Holger Tauer berücksichtigt jedoch nicht, dass diese Tiefenwahrnehmung nur funktioniert, wenn dem Betrachter bekannt ist, aus welcher Richtung das Licht kommt. Speziell beim Eigenschatten kann für den Betrachter eine Vertiefung wie eine Erhöhung/Wölbung wirken, wenn diese Information nicht bekannt ist. Aus Gewohnheit geht der Mensch immer davon aus, dass das Licht von oben kommt, wie es uns die Sonne erfahren lässt^{17 18}.

Zur Wahrnehmung von Tiefe hilft uns auch die Erfahrung des atmosphärischen Dunstes, weswegen Objekte, welche weit entfernt sind, durch Staubteilchen und Smog sowie Niederschlag blasser und kontrastärmer als nähere Objekte erscheinen. [Abbildung 6]



Abbildung 7: Beispiel für Atmosphärischer Dunst

¹⁷ Vgl. Ditzinger Thomas: „Illusion des Sehens: Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung“ 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2013. Seite 174

¹⁸ Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 43-52

Unser Sehsystem misst Gegenstände aufgrund von Erfahrungen und vergleicht sie miteinander, um Verhältnisse zu schaffen. Laut Holger Tauer ist der meistgenutzte Maßstab der Mensch selbst. Mit dem Wissen, dass die meisten Menschen eine durchschnittliche Körpergröße von 150 cm bis 200 cm erreichen, werden Objekte im Gesichtsfeld in das Verhältnis gesetzt. Je kleiner ein Objekt wirkt, desto weiter entfernt ist es und umgekehrt. Hier unterstützt auch die Fähigkeit zur Akkommodation. Diese gibt Informationen über den Stellung des Ziliarmuskels an das Gehirn weiter, woraus Informationen über die Tiefe hergeleitet werden können. Dadurch kann eine Entfernungsschätzung gemacht werden, welche für die Beurteilung von Größenverhältnissen unter Berücksichtigung des Abstandes ermöglicht.

Auch Farben haben Einfluss auf die Entfernungseinschätzung: Warme Farben wirken für den Betrachter näher als kalte Farben. Die Form der Tiefenwahrnehmung bezeichnet man als Farbperspektive. Dies könnte eine Folge des unterschiedlichen Brechungsverhaltens von Wellenlängen sein. Kalte Farben brechen sich stärker an der Augenlinse als warme und nehmen daher weniger Rezeptoren in Anspruch. Bei einer Kamera existiert dieses Phänomen als chromatische Aberration.

Die Wahrnehmung der Dichte von Texturen verändert sich bei gleichbleibender Struktur in der Tiefe. Der Texturgradient gilt als Maß einheitlich bleibender Strukturen einer Fläche, die durch Tiefe eine höhere Ortsfrequenz verursachen [Abbildung 5].

Betrachten wir ein Foto oder ein Video, welches mit einer normalen Kamera aufgenommen wurde, so können wir den Bildinhalt tatsächlich nicht räumlich sehen, konstruieren jedoch eine subjektive Raumwirkung durch unsere alltäglichen Erfahrungen. Selbiges geschieht mit der Bewegungswahrnehmung, welche im nächsten Kapitel erläutert werden soll.

2.3.2 Monokulare Bewegungshinweise

Bewegungen erhöhen ergänzend zu den monokularen Tiefenhinweisen das Raumwahrnehmungsvermögen. Monokulare Bewegungswahrnehmung entsteht durch Bewegungsparallaxe und Bewegungsverdeckung.

Die Bewegungsparallaxe bezeichnet das unterschiedlich schnelle Bewegen von Objekten in Abhängigkeit ihrer Entfernung zum Betrachter. Je weiter Objekte vom Betrachter entfernt sind, desto langsamer scheinen sie sich zu bewegen. Besonders die aktive Bewegungsparallaxe hat großen Einfluss auf die Raumwirkung des Menschen. Die Bewegungsparallaxe lässt sich in zwei unterschiedliche Arten unterteilen. Die **passive Bewegungsparallaxe** bezieht sich auf alle Bewegungen, die im Gesichtsfeld eines Betrachters wahrgenommen werden. Die **aktive Bewegungsparallaxe** meint Bewe-

gungen, welche durch den Betrachter geschehen. Zum Beispiel Kopfbewegungen oder Laufen¹⁹

Laut Aussagen verschiedener Ärzte erhöhen Menschen mit Störungen im binokularen Sehsystem ihr Raumerkennungsvermögen, indem sie leichte Bewegungen mit dem Kopf ausführen, um die aktive Bewegungsparallaxe als unterstützendes Tiefenmerkmal zu nutzen. Es entsteht eine relative Bewegung der betrachteten Objekte zueinander.

Holger Tauer erwähnt noch einen Sonderfall der Bewegungsparallaxe, den optischen Fluss. Dieser beschreibt das Verschwimmen des Gesichtsfeldes durch frontale, schnelle Bewegungen (z.B.: Auto fahren) - rund um das Zentrum des Gesichtsfeldes. Dieser Effekt tritt durch auf Bewegung ausgerichtete Rezeptoren im Netzhautrandbereich auf. Laut Mathias Leich dient der optische Fluss besonders der eigenen Geschwindigkeitseinschätzung^{20 17}.

Die Bewegungsverdeckung ist ein Tiefenindiz, hervorgerufen durch den monokularen Tiefenhinweis der Verdeckung in Verbindung mit dem monokularen Bewegungshinweis der Bewegungsparallaxe. Objekte verdecken dahinterstehende Objekte. Diese Verdeckung verändert sich permanent durch die Bewegungsparallaxe und gibt somit Auskunft über die Tiefe¹⁷

Laut einer laufenden Studie der Universität in Bonn können wir nicht von vornherein binokular sehen, sondern entwickeln erst im Laufe der ersten Monate das Sehen mit zwei Augen²¹. Über die Kindheitsjahre erlernen Sehorgane und Gehirn die Bilder beider Augen auszuwerten und miteinander zu verknüpfen. Aber auch als ausgewachsene Menschen mit gesundem Sehvermögen werden wir im Alltag mit den monokularen Tiefen- und Bewegungsinformationen konfrontiert. Der Gesichtssinn des Menschen ermöglicht durch einen horizontalen Augenabstand von durchschnittlich 65 mm ein räumliches Sehen bis zu 20 m. Andere Quellen sprechen von bis zu einem Kilometer²². Jedoch ist die Parallaxe bei zwei Metern bereits sehr klein, sodass kaum noch Disparitäten zwischen den beiden Augenbildern bestehen. Im Nahbereich hingegen können wir erst ab 10 bis 15 cm Abstand von den Augen eine Räumlichkeit erkennen, da sonst die Disparitäten zu groß sind und zu wenig korrespondierende Punkte beider Bilder

¹⁹ Vgl. Jockenhövel, Jesko: „Der digitale Film, Narration, Stereoskopie, Filmstil“. Dissertation an der Hochschule für Film und Fernsehen „Konrad Wolf“, Springer-Verlag, 13. November 2013. Seite 78

²⁰ Vgl. Lich, Mathias: „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaft: Visuelle Navigation: Dynamik der Wahrnehmung von Eigenbewegung“ Phillips-Universität Marburg, 2010. Seite 40

²¹ Vgl. Kavšek, Michael: Zwischenbericht Die Entwicklung des binokularen Sehens im ersten Lebensjahr, Universität Bonn. Seite 1-7

²² Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 32

cm, da in diesem Alter die Versteifung der Linse noch nicht einsetzt. Dies sollte bei Kinderfilmproduktionen beachtet werden, da es die Möglichkeit für einen größeren Tiefenraum bietet (siehe spätere Kapitel Stereobasis und Tiefenbudget bzw. Akkommodations-Konvergenz-Diskrepanz).

vorhanden sind. Unterhalb dieses Nahbereiches würden dann sogenannte Doppelbilder entstehen. Kinder bis 7 Jahre haben einen noch weiteren Nahbereich bis hin zu 4

Jörg Albrecht kategorisierte in seinem Buch „Die dritte Dimension – Elemente der räumlichen Wahrnehmung“ (1997) die Elemente der räumlichen Wahrnehmung in die physiologischen und psychologischen Elemente²². Dabei beschreiben die psychologischen Elemente die monokularen Tiefenhinweise, welche durch Erfahrungen der Wahrnehmung suggeriert werden (z.B.: Verdeckung, Linearperspektive, Schatten, etc.). Die physiologischen Wahrnehmungselemente stellen sich aus physisch bedingten monokularen Tiefen- und Bewegungshinweisen, der Akkommodation des Auges und den zwei wichtigsten binokularen physiologisch bedingten Wahrnehmungselementen, retinale Disparität und Konvergenz, zusammen²³.

2.4 Binokularsehen

Das Binokularsehen ermöglicht uns durch das zweite Auge und somit auch durch eine zweite Ansicht auf eine bestimmte Distanz hin räumlich zu sehen. Dies dient der besseren Koordinierung unserer Hände und Arme im Raum.

Unser Gehirn lässt die Bilder des rechten und linken Auges miteinander verschmelzen. Diese neu generierte Ansicht bezeichnet man als zyklisches Bild und bildet eine Ansicht direkt in der Mitte zwischen linkem und rechtem Auge.

Die retinale Disparität beschreibt die Bildunterschiede der beiden Augenbilder. Linkes und rechtes Auge betrachten aufgrund ihrer horizontal unterschiedlichen Position eine Szene aus unterschiedlichen Perspektiven. Hält man einen Stift beispielsweise nah vor die Augen und schließt wechselseitig einmal das linke und einmal das rechte Auge, wird deutlich, dass der Stift bei geöffnetem linken Auge rechts und mit dem anderen Auge betrachtet links im Gesichtsfeld zu sehen ist. [Abbildung 7]

²³ Vgl. Buchroithner, Manfred F. und Schenkel, Robert: „Kartographische Echt-3-D-Visualisierung – eine Ergänzung zu flachen Karten. (Herkunft unbekannt). Seite 3



Abbildung 8: Bildausschnitt aus den nachfolgenden Versuchen: Zwei Kameraansichten eines Spiegelrigs übereinander gelegt

Die Disparität beschreibt die Lageunterschiede zweier miteinander korrespondierender Punkte. Die Parallaxe beschreibt die Gesamtheit der Verschiebung zwischen den zwei Bildern der Bildakquisitionssysteme. Die Augen des Menschen liegen im Durchschnitt etwa 65 mm horizontal versetzt nebeneinander. Für die Berechnung von Disparitäten in Filmproduktionen wird dieser Wert zugrunde gelegt.

Die Konvergenz beschreibt das Zueinander-Neigen der Sehachsen. So können wir im Nahbereich unsere Augen zueinander ausrichten, um einen entfernten Punkt besser räumlich wahrnehmen zu können. Durch die Konvergenz schneiden (konvergieren) sich die Sehachsen je nach Entfernung des zu betrachtenden Objektes. Zu dieser Schnitachse hin wird die Akkommodation beider Augen ausgerichtet. Konvergenz und Akkommodation unterstützen sich gegenseitig²⁴, beschleunigen und verbessern somit die Schärfe-Regulierung der Linsen. Die maximal mögliche Ausrichtung für Fernpunkte im Rahmen des natürlichen Sehens, ist die parallele Ausrichtung. Die Divergenz ist unnatürlich und sollte vermieden werden.

²⁴ Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 29

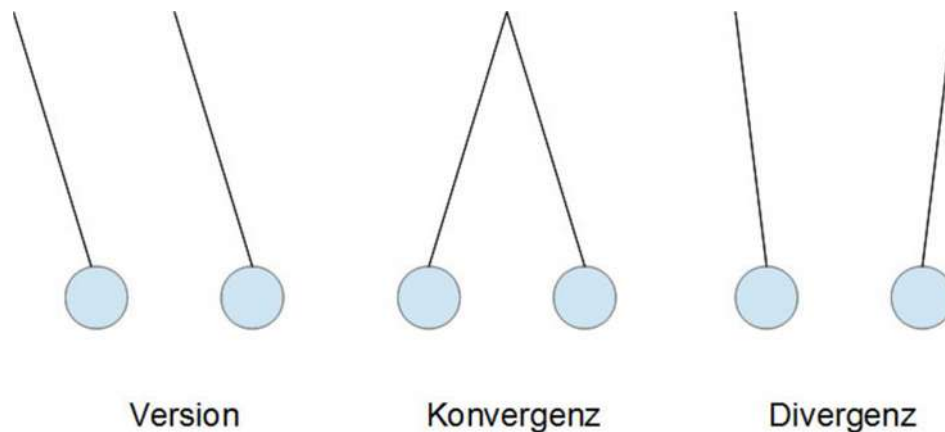


Abbildung 9: Augenausrichtungen: Die Divergenz ist unnatürlich, wird aber bis zu einem gewissen Maß vom Sehsystem toleriert

Monokulare Tiefen- und Bewegungsindikatoren ermöglichen die Einschätzung nicht nur im zweidimensionalen Sehzustand, sondern tragen auch im dreidimensionalen Sehzustand zur schnelleren Erkennung und Verarbeitung bei. Wenn wir von stereoskopischer Filmproduktion sprechen, sind also stets die monokularen und die binokularen bzw. stereoskopischen Tiefen- und Bewegungsinformationen zu berücksichtigen.

Horofter und Pnaumraum

Unsere Augen lassen die beiden Teilbilder, die sie getrennt herstellen, verschmelzen. Hierfür besitzen die Netzhäute korrespondierende Rezeptoren der Augen. Informationen, die auf einer bestimmten Stelle auf der Netzhaut abgebildet werden, werden mit den Informationen der korrespondierenden Rezeptoren des anderen Auges verglichen und zu einem Raumbild zusammengesetzt. Der Horofter bezeichnet eine gedachte horizontale Linie, die durch die Entfernung der jeweiligen Konvergenzstellung der Augen gebildet wird. Theoretisch wird diese Horofterlinie als Kreis betrachtet, mit dem Radius der Entfernung vom Betrachter zum Schnittpunkt der konvergierenden Sehachsen. Dabei sind die Teilbilder auf dem Horofter vollkommen deckungsgleich. Sie haben keine Disparität. Diese sogenannten Fixationspunkte bilden jedoch empirisch betrachtet einen gestreckten, ovalen Halbkreis. Alle auf dem Horofter befindlichen Punkte erscheinen gleich weit entfernt. Punkte vor und hinter dieser gedachten Linie verursachen aufgrund der mit dem Horofter einhergehenden Konvergenzstellung Querdissparationen in den Teilbildern der Augen. Sie weisen zu wenige miteinander korrespondierende Punkte auf. Aus dieser Querdissparation ermittelt das Gehirn die Entfernung zum Horofter. Dabei ist noch wichtig, ob das Objekt sich vor der gedachten Horofterlinie befindet oder dahinter. Vor dem Horofter liegende Objekte verursachen eine ungekreuzte Querdissparation, dahinterliegende Objekte, also auf der Seite des Betrachters liegend, erzeugen gekreuzte Querdissparationen. Je größer die Abstände zum Horofter sind, desto größer ist der Versatz der beiden Teilbilder. Ist der Versatz

zu groß, gelingt es dem Gehirn nicht mehr, diesen zu einem Raumbild verschmelzen zu lassen. Dieser Bereich, der sich um den Horopter bis zu der Grenze bildet, ab der Bilder zu große Disparitäten aufweisen, nennt man Pnaumraum. In diesem Bereich ist das räumliche Sehen möglich. Befinden sich Objekte außerhalb des Pnaumraums, sind sie nicht mehr räumlich wahrnehmbar, sondern werden als Doppelbilder erkannt²⁵

²⁶ ²⁷ .[Abbildung 9]

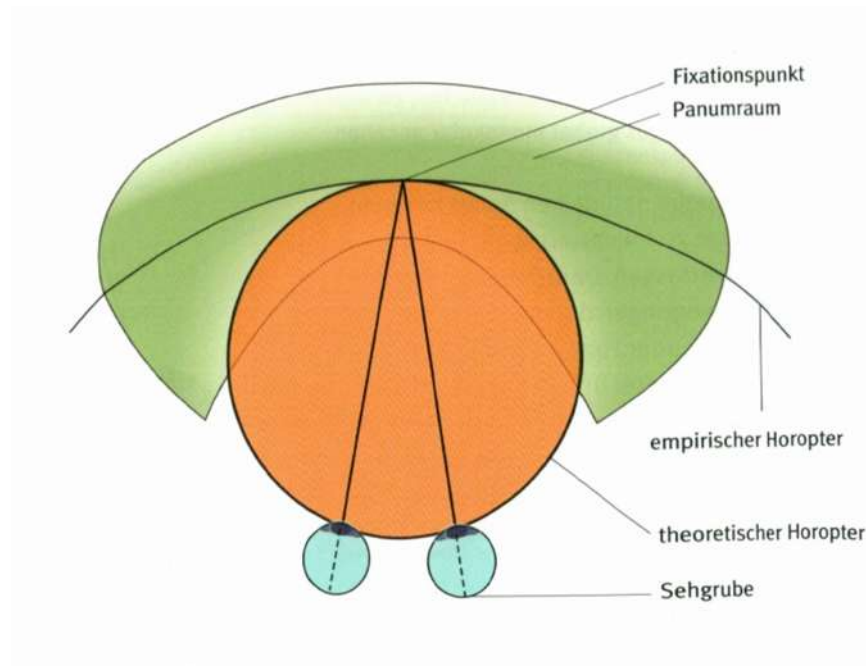


Abbildung 10: Schematische Zeichnung von Horopter und Pnaumraum

²⁵ Vgl. Behnisch; Matthias: „Stereo Vision Grundlagen“. Universität Bielefeld, Februar 2005. Seite 7

²⁶ Vgl. Lich, Mathias: „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaft: Visuelle Navigation: Dynamik der Wahrnehmung von Eigenbewegung“ Phillips-Universität Marburg, 2010. Seite 18

²⁷ Vgl. Jäger, Matthias: „3D-Filmen für Einsteiger, Disparität, Horopter, Panumraum“. URL: <http://www.weir3d.de/film/node/33> (Stand: 19.04.2015)

3 Stereoskopische Kamerasysteme

Das Stereokamera-System ist dem menschlichem Sehapparat nachempfunden. Es ergänzt das fehlende Auge einer einzelnen Kamera und vervollständigt so das dem menschlichen Sehen nachempfundene technische System. Die Verschachtelung der Bildinformationen im Gehirn ermöglicht das Verschmelzen der Teilbilder beider Augen zu einem Raumbild.

Ein stereoskopisches Kamerasystem unterscheidet sich im Wesentlichen von der herkömmlichen Kamera darin, dass es sich um ein System aus zwei Kameras handelt, bei dem die Kameras so ausgerichtet werden, dass ihre Bilder horizontal verschoben sind. Jede der beiden Kameras soll die Informationen für je ein Auge des Menschen liefern. Diese Bildinformationen müssen zwischen linkem und rechtem Auge getrennt werden, um den Raumeindruck herzustellen. Der Einfluss von Erfahrungen ermöglicht es, Objekte schneller zu erkennen. Informationen über Akkommodation und Konvergenz helfen Tiefen einzuschätzen und Größenverhältnisse zu schaffen.

Für den realistischen Tiefeneindruck müssen alle Parameter dem menschlichen Sehen entsprechen. Das Stereokamera-System bietet die technischen Möglichkeiten das natürliche räumliche Sehvermögen zu erweitern. So können beispielsweise Szenerien in größerer Entfernung räumlich dargestellt werden, die der Mensch mit seinem Sehsystem lediglich in monokularer Tiefe beurteilen könnte. Solche Möglichkeiten bringen einen surrealistischen Eindruck mit sich.

Zur Herstellung stereoskopischer Filme müssen die Parameter so eingerichtet werden, dass für den Betrachter eines Filmes möglichst ein natürliches Sehen nicht verhindert wird – es dürfen keine Konflikte entstehen. Das natürliche Sehen beim Anschauen eines Filmes wird von vielen Bedingungen beeinflusst. Alle diese Bedingungen und deren Abhängigkeiten werden nachfolgend erläutert.

3.1 Eigenschaften stereoskopische Kamerasysteme

3.1.1 Von der Stereobasis über die Parallaxe zur der Disparität

„Die Stereobasis ist der Abstand zwischen den beiden optischen Achsen einer Stereo-3D-Anordnung“.²⁸

Die Parallaxe definiert den Abstand der Teilbilder eines räumlichen Betrachtungssystems (z.B. auf der Leinwand)²⁶.

Die Disparität bezeichnet den Versatz zweier korrespondierender Punkte, welche nicht deckungsgleich auf den beiden Netzhautstellen abgebildet werden^{29 26}

Die Disparität beschreibt den Versatz eines Punktes, des linken und rechten Teilbildes zueinander. Liegt der Punkt direkt auf dem Horopter, so ist kein Versatz vorhanden und man spricht von der Nulldisparität³⁰

Die Disparität bezieht sich also konkret auf die Unterschiede der linken und rechten Teilbilder auf der Netzhaut. Die Parallaxe hingegen beschreibt sowohl den Versatz zweier zueinander gehörender Teilbildströme im Filmbereich, als auch den natürlichen Abstand unserer Augen. Die Stereobasis ist die Bezeichnung für den Abstand zweier Bildaufnahmesysteme oder genauer gesagt, den Abstand der optischen Achsen zweier Bildaufnahmesysteme. Betrachten wir einen 3D-Film, so erzeugt alles eine Disparität, was sich vor oder hinter der Leinwand zu befinden scheint. Dies geschieht durch die Parallaxe, welche unseren Augen zwei unterschiedliche Ansichten von einem Objekt anbietet. Die Parallaxe wiederum wird durch die Stereobasis erzeugt. Bei dieser Beschreibung wird die Abhängigkeit aller drei Faktoren ersichtlich. Die Disparität ist relativ zur Wiedergabegröße und dem Betrachtungsabstand. Die Parallaxe erzeugt die Disparität, ebenso in Abhängigkeit von Wiedergabegröße und Betrachtungsabstand. Die Stereobasis erzeugt die Parallaxe. Stereobasen werden in Millimeter, Zentimeter, oder gar in Meter angegeben. Parallaxen in Prozent und Disparitäten werden in Gradmaßen angegeben, um das Verhältnis von Wiedergabegröße und Betrachtungsabstand mit einzuschließen²⁶. Fixieren wir einen Punkt, so existiert keine Disparität. Wie schon beschrieben, liegt er dann auf dem Horopter. Im Sehzentrum erreichen wir einen Pnaum-

²⁸ Vgl. und Zitat: Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 58

²⁹ Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 5

³⁰ Vgl: Gerhard Heldmeier und Gerhard Neuweiler: „Vergleichende Tierphysiologie: Neuro- und Sinnesphysiologie“ Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003. Seite 441

raum von ca. zehn Winkelminuten Abweichung vom Horopter. In den Sehrandbereichen sogar bis zu 120 Winkelminuten.

3.1.2 Konvergenz, Version und Divergenz

Die Konvergenz beschreibt das Aufeinander-Zulaufen und Kreuzen zweier Sehachsen. Der Schnittpunkt beider Sehachsen liegt auf dem Horopter. Die Konvergenz zweier Kameras bildet im Schnittpunkt die Leinwandebene oder auch Konvergenzebene. Alles, was in dieser Ebene liegt, wird später auf der Wiedergabefläche dargestellt. Alles, was tiefer liegt, wirkt bei der Wiedergabe hinter der Wiedergabefläche und alles vor der Konvergenzebene tritt in den Raum hinein. Die Version beschreibt das parallele Ausrichten beider Sehachsen – versieren die Sehachsen, schneiden sie sich nicht und der Blick läuft ins Unendliche. Folglich existiert der Horopter bei der Version nicht.

Stereoskopische Kamerasysteme können konvergent, parallel oder divergent ausgerichtet werden. Die Divergenz wird als unnatürlich betrachtet. Dieses unnatürliche Sehen sollte nicht provoziert werden, wird jedoch bis zu einem geringen Maß vom menschlichen Sehsystem toleriert.

3.1.3 Akkomodations-Konvergenz-Diskrepanz

Die Akkommodation und die Ausrichtung der Augen sind stark voneinander abhängig. Durch Auswertungen aus dem Mittelhirndach werden Signale für Konvergenz und Akkommodation kombiniert ans Auge zurückgegeben. Beim Betrachten eines 3D-Filmes, wird das Auge gezwungen, die Akkommodation von der Vergenzausrichtung der Augen zu entkoppeln, da die Akkommodation immer auf die Wiedergabefläche gerichtet ist und die Konvergenz im künstlich visuellen Raum wechselt. Diese Art unnatürlichen Sehens wird Akkomodations-Konvergenz-Diskrepanz (AKD) genannt. Bis zu einem gewissen Grad toleriert das menschliche Sehen die AKD. Sie führt aber zur Ermüdung des menschlichen Sehsystems. Mit der Aufstellung verschiedener Richtlinien soll versucht werden, diesen Konflikt gering zu halten. Deren Wirkung ist jedoch sehr gering, da der Präsenzfaktor mitentscheidend und während einer Aufnahme im seltensten Falle bekannt ist. Zudem können sich solche Faktoren schon im Kinosaal maßgeblich unterscheiden, etwa zwischen der Betrachterperspektive von Personen, die in den vorderen Reihen und solchen, die in den hinteren Reihen sitzen. Stefan Eickelberg beschreibt in einem Bericht zur 15. ITG-Fachtagung für Elektronische Medien ein Verfahren, wie zukünftig dieses unnatürliche Sehen mittels KEV Konvergenz-Ebenen-Verschiebung reduziert werden kann. Hierfür sollen Disparitätskarten und Blickpunktterkennung helfen, die vom Zuschauer fokussierte Ebene immer auf Konvergenzebene zu verschieben. So würden die Bildpunkte, die ein Zuschauer fokussiert, auf der Wie-

dergabefläche mit Nullparallaxe erscheinen. Die Nullparallaxe entspricht der Nulldisparität. Alle Objekte in der Konvergenzebene haben keine Parallaxe. Diese Ebene bezeichnet man als Nullparallaxe oder Leinwandebene. Objekte, die davor und dahinter liegen, bilden den virtuellen Raum und besitzen je nach Position positive (hinter der Leinwand) oder negative Parallaxen (vor der Leinwand)³¹.

3.1.4 Key-Stoning und Ghosting

Key-Stoning bezeichnet im Allgemeinen die Trapezverzerrung, die durch das Positionieren einer Kamera und die Gegebenheiten der genutzten Optik entsteht. Ist eine Kamera tiefer oder höher als das zu betrachtende Objekt angeordnet (Froschperspektive/Vogelperspektive) oder seitlich gedreht, entstehen Verzerrungen von Objekten durch Entfernungsunterschiede des Sensors zum Objekt und durch Linsenkrümmungen³². Dies wird in der stereoskopischen Filmproduktion besonders hervorgerufen, wenn die Konvergenz der beiden Kameras zueinander ausgerichtet wird. So entstehen nicht deckungsgleiche Teilbildströme, welche beim späteren 3D-Sehen Konflikte im



Abbildung 11 [S3D]: Beispiel für Ghosting im Bild: Besonders an der Innenseite des linken Dinosaurierbeines und an den Baumrändern zu erkennen

Bild verursachen. An kontrastreichen Kanten könnten Ghosting-Effekte die Folge sein.

³¹Vgl: Eickelberg, Stefan: Bericht zur 15. ITG Fachtagung für Elektronische Medien Vorstellung eines Blickpunkt-adaptiven S3D- Postprocessing-Verfahrens Reduktion von Ermüdungserscheinungen bei Stereo-3D; FKT-Magazin 07/2013. Seite 382 - 386

³²Vgl: Stereo-3D-Info; URL: <http://stereo-3d-info.de/glossar-g.html#geisterbilder> (keine weiteren Angaben vorhanden)

„Ghosting“ ist die englische Bezeichnung für "Geisterbild". Im Deutschen nennt man es auch "Übersprechen". Ghosting kann viele Ursachen haben und bezeichnet die Fehlinformationsübertragung an das falsche Auge. So können beispielsweise durch starke Hell-Dunkel-Kontraste auch Informationen an das linke Auge übermittelt werden, welche eigentlich allein für das rechte Auge vorgesehen waren [Abbildung 10]. In diesem Falle entstehen dann Doppelkonturen, wie folgende Abbildung darstellt. In verschiedenen anderen Quellen wird auch der Begriff „Crosstalk“ verwendet³³. Man kann Key-Stoning vermeiden, indem keine Konvergenz eingerichtet wird, sondern die Kameras parallel zueinander ausgerichtet werden. Allerdings kann mit einer eingerichteten Konvergenz eine dem Original getreue Räumlichkeit nahestehender Objekte erzeugt werden. Die Konvergenzebene, oder auch Nullparallaxe, kann in der Postproduktion durch das sogenannte *horizontal-image-transfere* (HIT) mit relativ wenig Aufwand verändert werden³⁴.

3.1.5 Tiefenbudget

Das Tiefenbudget beschreibt den räumlich wirkenden Raum, der durch die Stereobasis und die genutzte Brennweite erzielt wird. Wie in Kapitel 2 erklärt wurde, werden Objekte außerhalb des Pnaumraumes nicht mehr räumlich wahrgenommen. Beim natürlichen Sehen ist das auch weniger auffällig, da wir nur einen kleinen Schärfebereich wahrnehmen und durch die Sakaden Konvergenz und Akkommodation immer wieder neu ausrichten. Betrachten wir jedoch einen 3D-Film, schauen wir immer auf eine konstante Ebene – die Leinwand (siehe auch Kapitel 3.1.3). So ist es bei stereoskopischen Filmproduktionen wichtig, durch Tiefenschärfe den Schärfebereich an die Entfernung und Disparität anzupassen²⁶. Alle Bereiche, welche höhere Disparitäten aufweisen als die, die das natürliche Sehen verwendet, sollten in einer Unschärfe liegen, um nicht störend zu wirken³⁰. Der scharfe Tiefenbereich, der zur Verfügung steht, wird Tiefenbudget genannt. Er ist für jede Szene speziell anzupassen³⁵. Je näher wir mit einem Objekt an die Kamera rücken, bei gleichbleibender Stereobasis und gleicher Brennweite, desto kleiner wird das Tiefenbudget, da die Parallaxen in der Tiefe sehr schnell überschritten werden. Für das Tiefenbudget unterschiedlicher Entfernungen eignen sich verschiedene Brennweiten. Ein Weitwinkelobjektiv ist besonders für den Nahbe-

³³ Vgl. Wegener, Claudia; Jockenhövel, Jeskou.a.: „3D-Kino – Studien zur Rezeption und Akzeptanz“, Springer VS, Wiesbaden 2012 Seite 49

³⁴ Vgl. Briede, Marc: „Stereo-3D-Workflow“. FKT-Magazin 11/2011 Seite 602 – 605

³⁵ Vgl. Schmidt, Ulrich: „Digitale Film- und Videotechnik, Von den Grundlagen der Film- und Videotechnik bis zu Digital-Video und Digital-Film“. 3., erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010. Seiten 240 - 246

reich geeignet, wohingegen mittlere und große Brennweiten in der Entfernung bessere Ergebnisse erzielen^{36 26}.

Das Tiefenbudget wird durch die Konvergenz im Raum eingeordnet. Sind die Kameras zueinander geneigt, entsteht im Schnittpunkt der Achsen die sogenannte Nullparallaxe. Wie bereits beschrieben, ermittelt das Gehirn anhand der Querdisparität, wo das Objekt zum Akkommodationspunkt liegt. Durch die Kameraausrichtung verursachten gekreuzte und ungekreuzte Parallaxen diesen Effekt. So ist die Nullparallaxe stets die Wiedergabeebene, also die Leinwand oder der Fernseher. Parallaxen mit negativer Querdisparität erscheinen dann im Raum und Parallaxen mit positiver Querdisparität wirken hinter der Leinwand. Sind die Kameras parallel ausgerichtet, so kreuzen sich die Kamera-Achsen nicht und es befindet sich alles vor der Leinwand.

3.1.6 Tiefenschärfe

Bei der stereoskopischen Filmproduktion ist man stets um eine große Tiefenschärfe bemüht - im Gegensatz zur 2D-Filmproduktion, bei der man aus gestalterischen Gründen meist eine geringe Tiefenschärfe erzielen möchte, um einen schöneren Raumeindruck zu erzeugen³⁷. Nach heutigen Ansichten ist die große Tiefenschärfe in der 3D-Produktion für den Raumeindruck notwendig, da die Unschärfe einer Kamera vor und hinter der Fokus-Ebene den Betrachter dazu zwingt, auf den fokussierten Bereich zu



*Abbildung 12: Beispiel für kleine Tiefenschärfe aus dem Versuch:
An dem kariertem Untergrund erkennt man wie klein der tatsächlich
scharfe Bereich ist*

³⁶ Vgl. Placke, Annika: „Grenzwertbestimmung stereoskopischer Seheindrücke“ Fachhochschule Köln.
Seite 13

³⁷ Vgl. Jäger, Matthias: „3D-Filmen für Einsteiger, Aufnahme“. URL: <http://www.weir3d.de/film/node/11>
(Stand: 19.04.2015)

achten. Diese Unterdrückung verhindert für den Betrachter des 3D-Raums die Konvergenz auf beliebige Objekte zu setzen. Offensichtlich wird hierbei die folgende Provokation der AKD, welche die Freiheit im 3D-Raum beliebig Objekte anzuschauen, ohnehin einschränkt.

Im Gegensatz zur Annahme der großer Tiefenschärfe stehen die Untersuchungen von Wolfgang Wesemann, welcher in seiner Arbeit belegt, dass die Raumwirkung durch unscharfe Objekte bis auf das Zehnfache des Pnaumraums erweitert werden kann, da unscharfe Objekte für das menschliche Sehsystem leichter miteinander fusionieren³⁸. Dies könnte als Kompromiss verstanden werden, indem Objekte mit hohen Parallaxenwerten mit Unschärfe dargestellt und dafür ein größeres Tiefenbudget erzielt werden kann. Die erreichbare Tiefenschärfe ist jedoch von vielen unterschiedlichen Bauelementen der einzelnen Kameras wie auch vom Stereo Rig abhängig. Vollsensoren erzeugen eine sehr geringe Tiefenschärfe. Sie werden grundsätzlich für die Filmproduktion bevorzugt (egal ob 2D oder 3D), da sie eine hohe Auflösung erzielen können. Weiterhin sind die Beschaffenheit der genutzten Optik und deren Blendenöffnung sehr entscheidend. Hier müssen oftmals Kompromisse gefunden werden, da Optiken mit weiten Blendenöffnungen zwar mehr Lichtausbeute erzielen, jedoch eine geringere Tiefenschärfe unterstützen. Auch die Wahl des Rig-Typs nimmt großen Einfluss auf die Tiefenschärfe, da gewisse Rig-Arten ebenfalls die Lichtausbeute verringern und weite Blendenöffnungen erzwingen.

3.2 Rig-Systeme

Nachfolgend sollen die beiden gängigsten Rigsysteme beleuchtet werden, welche nachfolgend in einem Forschungsversuch mit dem Fraunhofer Heinrich Hertz Institut zum Einsatz kommen sollen. Als weitere Quellen dienen auch die Erkenntnisse während der Durchführung des Versuches Teil 2.

3.2.1 Side-by-Side Rig

Das Side-by-Side Rig (SBS) ist vom Aufbau her dem menschlichem binokularem Sehsystem am deutlichsten nachempfunden. Es besteht aus einem horizontalen Schienensystem mit zwei Aufsatzvorrichtungen; jeweils eine für die Kamera des linken und eine für das rechte Auge. Die Kameras können in Konvergenz und Stereobasis vollkommen frei verändert werden, indem die Kameraaufsätze wie auf einem Slider ver-

³⁸Vgl: Wesemann, Wolfgang: „Beiträge zur Physiologie des Stereosehens zur Form des Horopters und zur Größe des Pnaumbereichs, Teil 1“. HFA Köln DOZ-Audgabe 04/2000. Seite 22 - 30

schoben werden. Lediglich die kleinste Stereobasis ist abhängig vom genutzten Kamerasystem. Die Problematik hierbei ist, dass hochauflösende Kameras viel Platz benötigen und keine kleinen Stereobasen mehr erlangt werden können. Das Side-by-Side Rig eignet sich sehr gut für Panorama-, Luft- und Landschaftsaufnahmen, bei denen die Entfernungen ohnehin größer sind und demnach größere Stereobasen benötigt werden als die, die das menschliche Auge bietet. Wichtig ist bei dieser Anordnung darauf zu achten, dass beide Kameras auch so genau wie möglich horizontal ausgerichtet sind³⁹. Auch Kompakt-3D-Kameras können als Sonderfall des Side-by-Side Rigs betrachtet werden, da beide Sehachsen horizontal nebeneinander angeordnet sind. Diese Kameras sind sehr handlich und schnell einsatzbereit, bieten jedoch auch kaum Einstellmöglichkeiten zur Veränderung der Stereobasis oder auch der Konvergenz.

Das Side-by-Side Rig ist eine sehr kostengünstige und einfache Variante, die häufig eingesetzt wird⁴⁰. Der Nachteil besteht lediglich in kleinen Stereobasen, die kaum bewerkstelligt werden können. Für diese Bereiche wird das Spiegelrig verwendet.



Abbildung 13: Beispiel eines SBS-Rig mit zwei Satellitenkameras

3.2.2 Spiegelrig

Für das Spiegelrig gibt es unterschiedliche Bauweisen. Bei der herkömmlichen Variante sind zwei Kamerasysteme, eines für den linken und eines für den rechten Teilbildstrom, im 90°-Winkel zueinander am Rig angeordnet³⁷. Ein halbdurchlässiger Spiegel versorgt beide Systeme mit den Bildinformationen. So wird ein Teil des Lichtes durch

³⁹Vgl: Tauer, Holger: „Stereo 3D Rigs“. URL: <http://www.stereo-3d-info.de/stereo-rigs-und-professionelle-3drigs.html> (Stand: 19.04.2015)

⁴⁰Vgl: Niesing, Birgit: „Film ab – Brille auf“ Zeitschrift: weiter.vorn. Ausgabe: 03/11 Seite 10-13

den Spiegel zur ersten Kamera hindurchgelassen und der zweite Teil des Lichtes durch Reflektion in die zweite Kamera gelenkt. Dieses zweite Bild wird folglich spiegelverkehrt aufgezeichnet und muss grundsätzlich für eine Filmproduktion gedreht werden. Je nach Art des Spiegelrigs können eine Kamera, beide Kameras oder auch der Spiegel bewegt und durch deren Ausrichtungsveränderung die Konvergenz und Stereobasis geändert werden.

Durch den Spiegel können zwar die Nachteile eines Side-by-Side Rig kompensiert werden, jedoch bringt das Spiegelrig durch seinen komplexen Aufbau und den Spiegel ebenfalls eine Vielzahl von Nachteilen und Einschränkungen mit sich. Zum einen ist dieses System sehr schwer und besonders durch den speziellen Spiegel auch sehr teuer. Der Spiegel selbst verursacht Farbverfälschungen und Fehler durch Staub und Verunreinigung. Weiterhin verursacht der Spiegel eine gewisse Lichtunempfindlichkeit, da für beide Kameras nur die halbe Lichtintensität zur Verfügung steht. Dies führt zum Einsatz großer Vollsensoren und schränkt eine große Tiefenschärfe ein. Die notwendige Feinjustierung des Rig ist sehr zeitaufwändig⁴¹.



Abbildung 14: Spiegelrig aus dem Versuch des Fraunhofer-Heinrich-Hertz-Institut

⁴¹Vgl: Bücken, Rainer: „ITG-Fachausschüsse, Stereoskopie und 3D-TV-Systeme“ Zeitschrift: FKT Ausgabe: 04/2009 Seite 189 - 192

4 Weiteres 3D-Bild-erzeugendes Kamerasystem

Das Spiegelrig und auch das Side-by-Side-Rig ermöglichen die Generierung zweier Teilbildströme für unser Sehsystem. Die Wahl der Stereobasis und des Tiefenbudgets werden am Set eingerichtet und sind nur mit großem Postproduktionsaufwand und qualitativen Verlusten im Nachhinein veränderbar. Für eine 3D-Produktion ist dieses Verfahren ungeeignet, da die Mehrfachverwertung von Filmen, beispielsweise im Kino, auf Blue-Ray oder gar im Fernsehen oder Internet, jeweils unterschiedliche Bedingungen an diese Einstellungsparameter hat. Walt Disney's Bestreben nach 3D-Filmen, der Kompatibilität von Realszenen und „Computer-Generated Imagery“ (CGI) brachte in den letzten Jahren eine ganz neue Herangehensweise für 3D-Produktionen auf den Markt, welche auch die nachträgliche Veränderung von Stereobasis und Tiefenbudget ermöglicht. Zusammen mit dem deutschen Kamera-Hersteller ARRI und dem Fraunhofer-Heinrich-Hertz-Institut für Telekommunikation wurde das sogenannte Trifocal-Rig mit einem Hybridekamera-System konstruiert.

4.1.1 Tiefenkarten

Eine Tiefenkarte ist ein Graustufenbild, in dem die Hell-Dunkel-Unterschiede Auskunft über die Tiefe im Bild geben. Solche Karten lassen sich aus Kamera-Systemen aufzeichnen, welche mindestens zwei unterschiedliche Perspektiven haben. Jedoch wäre ein reines Stereosystem nur unter optimalen Bedingungen für eine Tiefenkarten-Erzeugung geeignet. Es müsste eine photometrische Kalibrierung mit beiden Kameras vorgenommen, alle optischen Verzerrungen ausgeschlossen und beide Kameras so ausgerichtet werden, dass verdeckte Punkte im Raum von mindestens einem System erfasst werden. Diese Bedingungen sind mit zwei Kameras kaum vollkommen zu bewerkstelligen. Die Erzeugung von Tiefenkarten ist der erste Ansatz, welcher zur Akquisition von Lichtfeldern im kleinsten vorstellbaren Maße geht. Anhand von mindestens zwei Kameras wird jeder Punkt im Raum mit dem des zweiten Teilbildes verglichen und über Epipolargeometrie im Raum zugeordnet. Aus den Tiefenkarten können Parameter wie die Stereobasis errechnet werden. Die Tiefenkarten werden genauer, je mehr Kameras zur Akquisition eingesetzt werden^{42 43}.

⁴² Vgl. Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010. Seite 234-258

⁴³ Vgl. Gheța, Ioana: „Fusion von Stereo- und Fokusserien“. Universität Karlsruhe (TH) Seite 1-3



Abbildung 15: Beispiel für eine Tiefenkarte aus dem Versuch einer Lichtfeldkamera

4.2 trifocales Kamerasystem

Das Trifocale Kamerasystem ermöglicht eine neue Art der 3D-Produktion, welche auch „Hybrid 3D“ genannt wird⁴⁴. Das Grundprinzip dieses Kamerasystems ist die Nutzung einer hochauflösenden 2D-Kamera von ARRI und zwei Satellitenkameras, die jeweils links und rechts neben der ARRI Alexa positioniert sind. Die Hauptkamera zeichnet 2D ein normales Videobild auf. Die zwei Satellitenkameras erzeugen durch ihren linken und rechten Versatz zwei weitere Ansichten in 2K-Auflösung (2048 x 1080)⁴⁵, aus denen eine dichte Tiefenkarte konstruiert wird. Grundsätzlich würde für dieses System eine Satellitenkamera ausreichen, jedoch werden zwei Kameras zum einen für eine qualitative Tiefenkarte und zum anderen zur Vermeidung von Verdeckungen genutzt, um Fehler in der Postproduktion zu vermeiden. Das System wurde erstmalig auf der NAB vorgestellt⁴⁶. Howard Lukk, Direktor der Produktion des Kurzfilmes „Make Belive“,

⁴⁴ Vgl. Giardina, Carolyn: „SMPTE: Disney Exec Howard Lukk Details 'Hybrid 3D' Test Shoot“ URL: <http://www.hollywoodreporter.com/behind-screen/smp-te-disney-exec-howard-lukk-650253> Zeitschrift: The Hollywood Reporter. Veröffentlicht: 22.10.2013 (Stand 22.04.2015)

⁴⁴ Vgl. Indiecarn GS2K, Datenblatt „The distinct aesthetic of the Indiecarn is all over the film!“ (Stand: 10.06.2015)

⁴⁶ Vgl. Quandt, Gudrun: „Hybrid 2D/3D – Stereoinhalte mit Hilfe von Tiefeninformationen generieren“. URL: <https://idw-online.de/de/news526977> Onlineportal: idw - Informationsdienst Wissenschaft) 28.05.2015



Abbildung 16: Trifocal-Rig des 3IT in Berlin

sieht in dieser Technologie die Zukunft: "Computational cinematography is where things are going,[...]"⁴⁷. Die Technologie hat noch viel Verbesserungsbedarf. Jedoch ist es durch die Tiefenkarten, die durch die zwei Satellitenkameras erzeugt werden, möglich, Stereobasis, Konvergenz und Tiefenbudget im Nachhinein ohne große Bearbeitung einzustellen. Die Tiefenkarten definieren für das Bild der Kamera, welches Objekt in welcher Tiefe steht. Somit können stereoskopische Ansichten im Nachhinein erstellt werden und auf jedes Ausgabemedium problemlos angepasst werden. Zudem ist das System kaum komplizierter als eine herkömmliche Kamera. Da die genannten Parameter im Nachhinein definiert werden können, ist am Set kein aufwändiges Einrichten und Justieren der Kamera mehr notwendig. Das reduziert den Personalaufwand und die Produktionszeit. Durch die Tiefenkarten wird ebenfalls die Kompatibilität zu CGI verbessert. CGI-Animationsprogramme arbeiten schon sehr lange bei Hintergrundprozessen mit Tiefenkarten und können somit besser in Realszenen eingesetzt werden⁴⁰. In dunklen, kontrastarmen Szenen, ist es den Satellitenkameras kaum möglich eine Tiefenkarte zu erzeugen, da dabei das Signalrauschverhältnis sehr schlecht wird. Das heißt, es fließen zu viele Fehlinformationen in das Bild ein, welche die Tiefenkarte fehlerhaft bis unbrauchbar machen. So erklärt es auch das Fraunhofer-Heinrich-Hertz-Institut: „Das funktioniert auch sehr gut, aber halt nicht immer perfekt. Eine Nachverarbeitung/Restfehlerkorrektur ist meist nötig.“ Nach wie vor wird am Trifocalen Kamerasystem geforscht⁴⁸.

⁴⁷ Zitat: (Autor nicht angegeben) Disney Digital Studio Services: „Disney, ARRI and Fraunhofer partner to Create Hybrid 3D Camera System: Make Believe is the First Short Movie to Use it“ URL: <http://disneydigitalstudio.com/4177/disney-arri-and-fraunhofer-partner-to-create-hybrid-3d-camera-system-make-believe-is-the-first-short-movie-to-use-it/> (Stand 28.05.2015)

⁴⁸ Vgl. Tanger, Ralf: „3FLEX – Postproduktion mit Tiefe“ Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, (Veröffentlichung unbekannt)

5 Lichtfeldkamera

Etwa ein Viertel aller Insekten hat ein sogenanntes Komplexauge, bestehend aus vielen kleinen Linsen, die aneinander angeordnet sind. Insekten haben somit nicht nur eine viel höhere zeitliche Auflösung als wir Menschen, sondern wissen genau, wo beispielsweise die Sonne steht, obwohl sie diese selbst nicht sehen können. Sie können durch ihr Komplexauge, auch Facettenauge genannt, zwischen den einzelnen Linsen Beziehungen über das eintreffende Licht auf ein Objekt herstellen und sich somit besser orientieren. Der Mensch versucht – ähnlich wie Insekten mit Komplexaugen - aus mehreren Bildakquisitionssystemen Tiefeninformationen herzuleiten. Allerdings hat solch ein Komplex- oder Facettenauge nicht nur Vorteile. Denn die Auflösung dessen, was beispielsweise eine Fliege sieht, entspricht in etwa einem Hundertzwanzigstel dessen, was wir Menschen sehen können. Dennoch hat sich die Forschung zur 3D-Filmproduktion die Vorteile des Komplexauges zunutze gemacht. Die sogenannte Lichtfeldkamera ist das technische Ebenbild eines Facettenauges und ermöglicht die Akquisition eines Lichtfeldes in ganz neuer Form⁴⁹.

5.1 Lichtfeld

Die Erkenntnisse zum Lichtfeld haben eine 150jährige Geschichte. Bereits Michael Faraday legte 1846 dar, dass sich Licht ebenso ähnlich in einem Feld aufbaut wie Magnetwellen: „The velocity of light through space is about 190,000 miles in a second; the velocity of electricity is, by the experiments of Wheatstone, shown to be as great as this, if not greater[...]“⁵⁰

Das Lichtfeld wird als 7-dimensionale Funktion, auch plenotische Funktion genannt, betrachtet. Sie setzt sich aus vier Komponenten zusammen: aus der Position des Betrachters, die in drei Dimensionen beschrieben wird (x, y, z), dem Licht, beschreiben durch zwei Winkel (θ, φ), der Zeit (t) und der Wellenlänge des Lichtstrahls ($I(\lambda)$). Diese 7-dimensionale Funktion lässt sich auf vier Dimensionen komprimieren. Dies ist möglich, da davon ausgegangen wird, das Licht linear und konstant verläuft, solange keine Verdeckungen auftreten und die Lichtwellenlängen nicht relevant sind, da sie unsere Rezeptoren ohnehin von UV- und IR-Licht trennen sowie in die drei Grundfarben separieren. Nach der Theorie des Lichtfeldes können Lichtstrahlen als Vektoren in

⁴⁹ Vgl. Schöneberger, N: „Das Komplexauge und das Sehen bei den Insekten“ Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, 1978. Seite 1-6

⁵⁰ Zitiert: Michael Faraday: „Thoughts on Ray Vibrations“ URL: <http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/wfarad1846.html> (Stand: 3.06.2015)

unendlicher Dichte betrachtet werden. Erzeugt man ein Bild-Akquisitionssystem mit mehreren unterschiedlichen Perspektiven, so kann aus den vertikalen und horizontalen Versätzen der einzelnen Bildaufnahmegeräte eine Beziehung über einzelne Vektoren des gesamten Lichtfeldes abgeleitet werden^{51 52}.

5.2 Lichtfeldkamera

Eine Lichtfeldkamera ist in erster Linie eine herkömmliche Kamera. Sie besteht wie jedes andere System aus einem optischen Bauelement (Objektiv), einem Bildsensor, einem A/D-Wandler und verschiedenen Filtern und Prozessoreinheiten. Im Unterschied zu einer herkömmlichen Kamera verfügt sie daneben über ein zusätzliches Bauteil – dem Linsengitter. Das Linsengitter ist als Linsenmatrix zu verstehen. Je nach Bauart sind n Linsen untereinander und nebeneinander angeordnet. Die Linsen sind rund, sodass zwischen den Linsen kleine Räume entstehen, welche so gering wie möglich gehalten werden sollten, um keinen unnötigen Auflösungsverlust zu erhalten. Eine Lichtfeldkamera bezieht die Informationen des Lichtfeldes (L) aus

$$L(u, v, s, t)$$

wobei u und v die zweidimensionale Ausbreitung auf dem Sensor definiert. s und t beschreiben die zweidimensionale Ausbreitung des Lichtes der zugehörigen Mikrolinse, welche die Strahlen auf die Pixel lenkt.

Reng Ng et al. veröffentlichten im Februar 2005 einen technischen Bericht über ein durchgeführtes Projekt zum Bau einer Lichtfeldkamera an der Stanford University. Dazu setzte die Forschergruppe ein Mikrolinsengitter bestehend aus 290 x 290 Linsen mit jeweils einem Durchmesser von 125 μm in einem bestimmten Abstand vor den Sensor. Der Sensor hatte eine Auflösung von 4000 x 4000 Pixel. Dabei war die Größe einer Einzelbildzelle 9 μm . Daraus resultiert, dass für jedes einzelne Bild einer Mikrolinse eine Auflösung von 13,8 x 13,8 Pixel entstanden sein muss. Vor dem Mikrolinsengitter wurde ein herkömmliches Objektiv aufgesetzt, welches das Licht auf den Sensor lenkt. Jede einzelne Mikrolinse verfügte durch seine Position über eine andere Perspektive zu dem einfallenden Licht⁵³. Die Linsen zeichnen dadurch nicht das gesamte Licht,

⁵¹ Vgl. Stoller, Detlef: „Filmtechnik für Hollywood, Neueameratechnologie kann Blickwinkel und Schärfe nachträglich ändern“ URL: <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Optoelektronik/Neue-Kameratechnologie-Blickwinkel-Schaeerfe-nachtraeglich-veraendern> (Stand 08.05.2015)

⁵² Vgl. Buroh, Dennis „Fourier Slice Photography, Im Rahmen des Computer Vision Seminars (WS 10/11)“. Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel, 16.02.2011

⁵³ Vgl. Ng Reng, Levoy, Marc, etc: „Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera“ Stanford University, Februar 2005 Seite 1-3

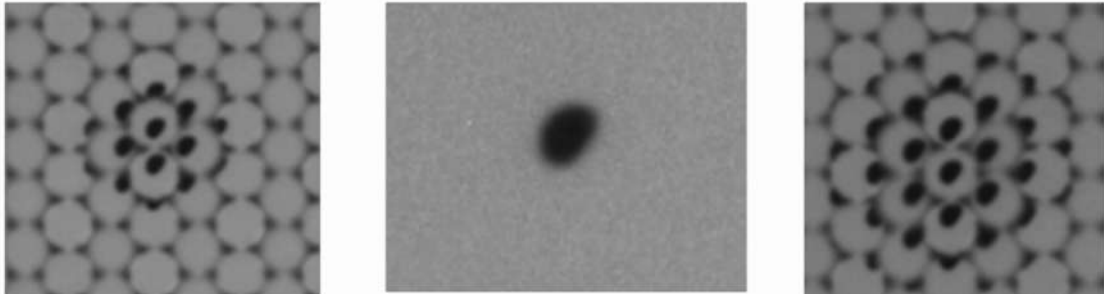


Abbildung 18: Ausschnitt eines Rohbildes des Mikrolinsengitters mitte: Ein schwarzer Punkt wie er aus der Aufnahme errechnet wurde; links: weit weg fotografiert; rechts: nah fotografiert

aber dafür die Richtung eines Lichtstrahls auf. Vorstellbar wird die Konstruktion, wenn man das Mikrolinsengitter als Kameragitter betrachtet. Jede Kamera zeichnet einen Raum aus einer anderen Perspektive auf - diese unterschiedlichen Perspektiven geben Informationen über die Tiefe der Objekte im Bild wieder. Ist ein Objekt nah vor der Lichtfeldkamera, so sind Teile des Objektes in vielen nebeneinanderliegenden Mikrolinsen wieder zu finden. Ist es weit entfernt, so zeichnen auch weniger Mikrolinsen das vom Objekt entsendete Licht auf. Ähnlich können auch Beziehungen zum Fokus hergestellt werden.

Je nach Design des Mikrolinsengitters wird die Auflösung mehr oder weniger verringert. Der Hersteller Lytro, welcher Lichtfeldkameras bereits für den Heimgebrauch vertreibt, erzielt in etwa ein Zehntel Auflösung der tatsächlichen Sensorauflösung. Lytro baut die Lichtfeldkameras nach dem Prinzip von Ng et al. Raytrix hingegen erreicht ein Viertel der Sensorauflösung. Lichtfeldkameras dieses Herstellers sind nach dem Prinzip von Georgiev et al. aufgebaut. Zwar ist das Mikrolinsengitter gleich eingesetzt wie nach dem Bauprinzip von Ng et al, jedoch werden unterschiedliche Brennweiten im Mikrolinsengitter eingebaut, um eine größere Tiefenschärfe zu erreichen. Ein wichtiges Merkmal dieser Kameras ist, dass sie eine feste unveränderliche Blende besitzen, die maßgeblich durch das Mikrolinsengitter geprägt ist. Die Hauptlinse, das Objektiv, muss für eine verlustfreie Abbildung den gleichen Blendenwert besitzen. Im Falle, dass die Blende des Objektivs kleiner ist, werden nicht alle Pixel unterhalb einer Mikrolinse belichtet und es ist mit einem Auflösungsverlust zu rechnen. Ist die Blende des Objektivs größer, werden Pixel unterhalb der benachbarten Mikrolinsen von beiden belichtet und es sind aus diesen Pixeln keine Informationen mehr zu entnehmen^{54 55}.

⁵⁴ Vgl. Ziegler, Mathias: „Lichtfeldaufnahmesystem für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion“ Magazin: FKT, 12/2014 Seite 656-660

⁵⁵ Vgl. Bomancz, Tycho: „Lichtfelder und Linsen, Seminar Visual Computing“. Universität Stuttgart, Sommersemester 2011, Seite 1-6

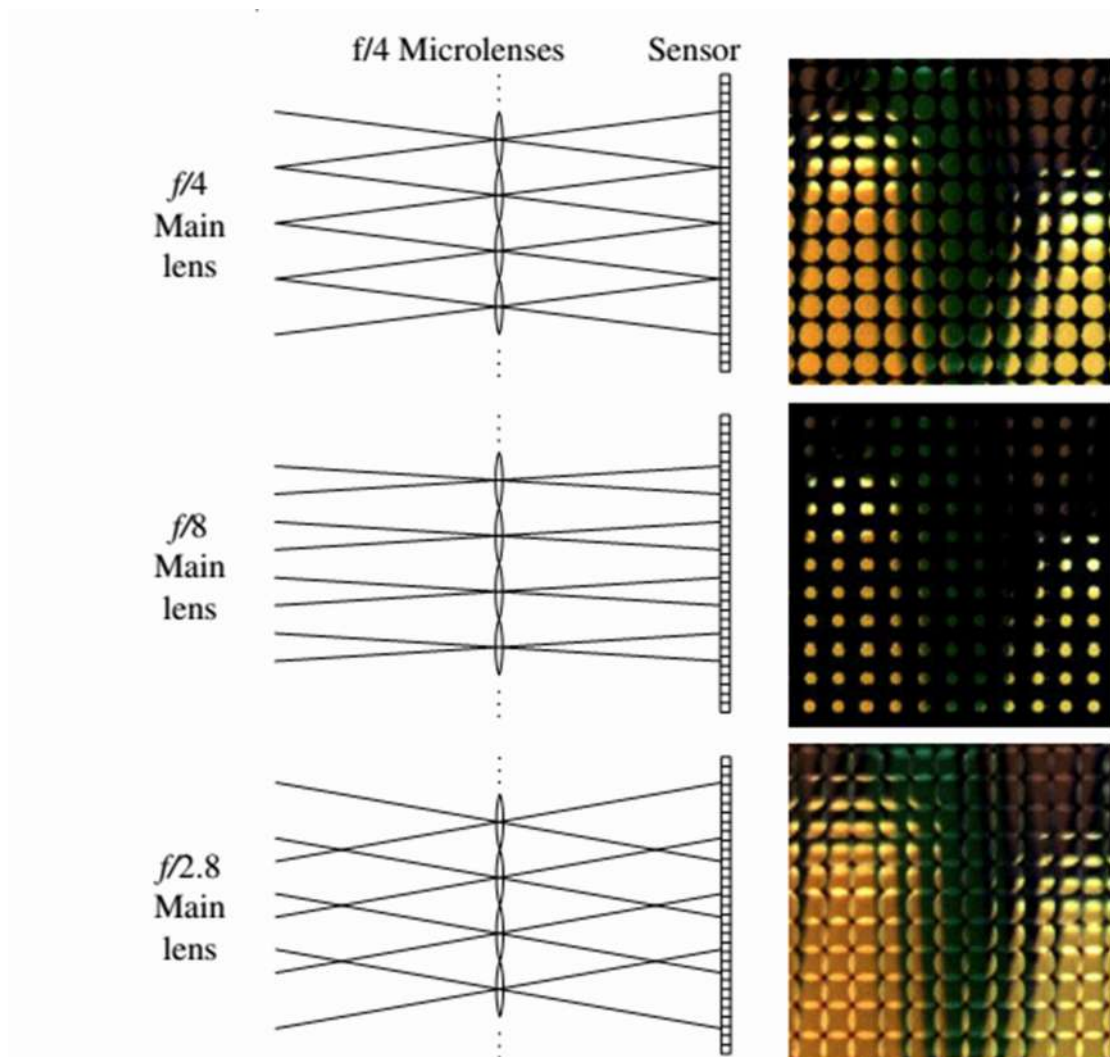


Abbildung 19: Mikrolinsenkalibrierung mit Objektiv; Oben: gleiche Blende von Mikrolinse und Optik; Mitte: Untersteuerung durch zu kleine Blende der Optik; Unten: Übersteuerung durch zu große Blende der optik

Aus dem Facettenbild, welches man von einer Lichtfeldkamera erhält, können neben den Helligkeits-Wellenlängen- und Ortinformationen auch Informationen über die Lichtrichtung gewonnen werden. Somit sind Schärfe-Rekonstruktionen und perspektivische Verschiebungen der aufgezeichneten Szene über komplexe Berechnungen im Nachhinein möglich. Besonders interessant ist eine Lichtfeldkamera auch, weil man entsprechend der Anzahl von Mikrolinsen auch Perspektiven hat. Wie im Kapitel 4.1.1 beschrieben wird, sind durch mehrere Ansichten die Entfernungen von Objekten im Raum definierbar. Vergleichend mit dem Trifocal Rig, welches durch drei Kameras auch drei Ansichten bietet, kann eine Lichtfeldkamera mehrere tausend Ansichten aufzeichnen, jedoch wie schon erwähnt auf Kosten der Auflösung. Hinzu kommt, dass die kleinen Mikrolinsen und deren ebenso kleiner Abstand zueinander eine starke Einschränkung in die Tiefe zur Folge hat. Die Tiefenkarten einer Lichtfeldkamera können

nur dann sinnvoll geschätzt werden, wenn dem Objekt genug Informationen über seine Oberflächenbeschaffenheit und deren Position entnommen werden kann⁵⁶.

Ein anderes Modell von einer Lichtfeldkamera baute eine Forschergruppe Georgiev et al. in einem Versuch auf. Sie setzten kein Mikrolinsenarray vor den Sensor, sondern ein Linsengitter von 24 Linsen vor das Objektiv. Dadurch konnten noch viel mehr Tiefeninformationen erlangt werden, jedoch sind die Bilder auch entsprechend stärker in ihrer Auflösung reduziert. Nach Internetrecherchen hat besonders Pixar's-Animationshaus großes Interesse an dieser Art Lichtfeldkamera gezeigt. Seit 2010 sind fast ein Dutzend Patente von Pixar's auf diese Lichtfeldkamera und die speziell präparierten Lichtfeld-Objektive angemeldet wurden. Auf eine Anfrage über nähere Informationen wurde nicht reagiert. Es lässt sich vermuten, dass das Animationshaus mit dieser Lichtfeldkamera Bewegungen aufzeichnen möchte, um sie auf animierte Objekte zu übertragen. Hierfür wäre zumindest keine hohe Auflösung notwendig.⁵¹

6 Vergleich von Bildparametern beim Einsatz von einer Lichtfeldkamera und stereoskopischen Kamerasystemen

6.1 Erläuterung der zu vergleichenden Bildparameter

Die folgende Untersuchung soll feststellen worin sich die 3D-Bilder eines Spiegelrig und eine Lichtfeldkamera nach dem Prinzip von Ng. et al unterscheiden. Kameraspezifische Faktoren wie Sensor, AD-Wandler werden in diesem Versuch nicht berücksichtigt. Lediglich die folgenden Parameter sollen untersucht werden:

Stereobasis und Parallaxe	Die Stereobasis definiert den Abstand der Bildaufnahmesysteme für linkes und rechtes Auge. Eine Lichtfeldkamera hat keine Stereobasis, da es sich um eine einzelne Kamera handelt und die Parallaxe im Nachhinein durch die Berechnung des Lichtfeldes erfolgt. Um eine theoretische Stereobasis der Lichtfeldkamera zu errechnen wird nachfolgend eine Verhältnissgleichung aufgestellt, aus der sich diese berechnen lässt.
Farbdifferenzen der Teilbilder	Für die zwei notwendigen Stereoteilströme für linkes und rechtes Auge wird i.d.R ein stereoskopisches Kamerasystem eingesetzt, welches aus zwei bauähnlichen Kamerabodys und Objektiven besteht. Farbdifferenzen der beiden Teilbilder können ihre Ursache in Bautoleranzen oder auch der genutzten Rigart haben.
Vertikaler Versatz	Unter vertikalem Versatz versteht man die Ausrichtung zweier Sehachsen in vertikaler Ebene. Die Betrachtung der beiden Sehachsen auf Objekte neigt sich vertikal unterschiedlich.
Optische Verzerrungen	Unter optischen Verzerrungen versteht man die Gleichheit der Objekte zum Original. Beide Aufnahmesysteme sollten sich darin möglichst nicht unterscheiden. Jedoch entstehen überall wo Linsen eingesetzt werden und demzufolge Licht gebrochen wird auch Verzerrungen.

Synchronität	Wenn zwei Bildaufnahmesysteme für linkes und rechtes Auge Informationen zur Räumlichkeit aufnehmen sollen, so muss gewährleistet sein, dass beide Systeme zeitlich synchron laufen. Dies betrifft nicht nur die Aufnahme, sondern auch Veränderungen in Schärfe, Zoom oder auch Brennweite.
Tiefenschärfe	Die Tiefenschärfe eines herkömmlichen Kamerasystems ist maßgeblich vom genutzten Objektiv, vom genutzten Sensor und eingesetzten Filtern abhängig. Diese Tiefenschärfe steht oft im Konflikt mit Auflösung und Lichtbedingungen. Bei hohen Auflösungen und nicht optimalen Lichtbedingungen ist man dazu gezwungen eine kleine Tiefenschärfe in Kauf zu nehmen. Dies kann auch ein gestalterisches Mittel sein, ist aber besonders in der 3D-Produktion nicht immer von Vorteil. Eine Lichtfeldkamera ist zwar an die gleichen Bedingungen geknüpft, kann jedoch aus den gewonnenen Daten eine größere Tiefenschärfe regenerieren.

Tabelle 1: Erläuterung der zu untersuchenden Parameter

Da eine Lichtfeldkamera keine Stereobasis besitzt, hab ich die Überlegung angestellt, wie eine Stereobasis eines stereoskopischen Kamerasystems theoretisch sein müsste, um eine gleiche Parallaxe in Abhängigkeit der Entfernung zum Objekt zu erlangen. Diese Überlegung brachte mich zu der hier aufgestellten Verhältnissgleichung:

$$\frac{aS}{aW} = \frac{lS}{lW}$$

Wobei aS den Abstand auf dem Sensor definiert, aW den Abstand auf der Leinwand/Wiedegabefläche und lS sowie lW die Distanzen zu Sensor und Wiedergabefläche. Daraus ergibt sich folgende Rechnung:

$$SB = \frac{lW * \frac{aS}{2}}{f}$$

wobei f für die Brennweite des genutzten Objektivs steht. Die Parallaxe wird am Computer in Pixeln gemessen und über die Größen der Sensorelemente in eine Länge umgerechnet. SB steht für Stereobasis. Ein Beispiel hierfür:

Am Computer wird eine Parallaxe von n Pixeln gemessen, welche mit einem Sensor aufgezeichnet wurden, dessen Einzelbildzellen m Mikrometer groß ist, ergibt sich:

$$n * \frac{m}{1000} = aS$$

Brennweite und Entfernung der Objekte zum Sensor werden in den Versuchen dokumentiert. Die Formel kann Abweichungen nicht ausschließen, da die effektive Linsenebene von Objektiv zu Objektiv abweichen kann. Es ist demzufolge keine allgemein geltende Information über die Gegenstandsweite vorhanden.

Aus der Gleichung kann man auch sehr einfach die Parallaxe in Prozent errechnen, wenn die Auflösung der aufgezeichneten Bilder bekannt ist. Ist eine Parallaxe von n Pixeln gemessen worden und das Bild wurde mit einer horizontalen Auflösung von c Pixeln aufgezeichnet, so ist die Parallaxe:

$$\frac{n}{c} * 100 = \text{Parallaxe in \%}$$

Die Parallaxe sollte möglichst immer bei ca. 3% gehalten werden.

Weitere Bildparameter

Auflösung: Die Auflösung spielt in der bildgebenden Qualität eine sehr große Rolle und wirkt sich auch auf Schärfe und Kontrast stark aus. Die Betrachtung der Auflösung wird zugunsten der Lichtfeldkamera dem eigentlichen Anspruch reduziert. Sie wird jedoch hypothetisch in der Schlussfolgerung mit einbezogen.

6.2 Erläuterung zusätzlich eingesetzter Technik

STAN ist ein elektronischer Kameraassistent, welcher bei stereoskopischer Filmproduktion Einsatz findet. STAN steht für stereoscopic analyzer und ist in der Lage, zwei Kamerasysteme für eine stereoskopische Produktion miteinander abzugleichen. Beide Bildsignale werden dem System eingegeben und anhand der Bild- und Metadaten können nahezu alle Parameter der Kameras ausgewertet werden. So werden zum Beispiel vertikale Versätze, Zoomdifferenzen, Keystone oder auch Verkippungen der Kameras angegeben und können korrigiert werden. Durch die zwei Ansichten der Kamera kann der STAN sogar Fern- und Nahpunkt abschätzen und Angaben über das Tiefenbudget liefern. Darüber kann man entscheiden, ob die Stereobasis noch verändert werden sollte. Das besonders

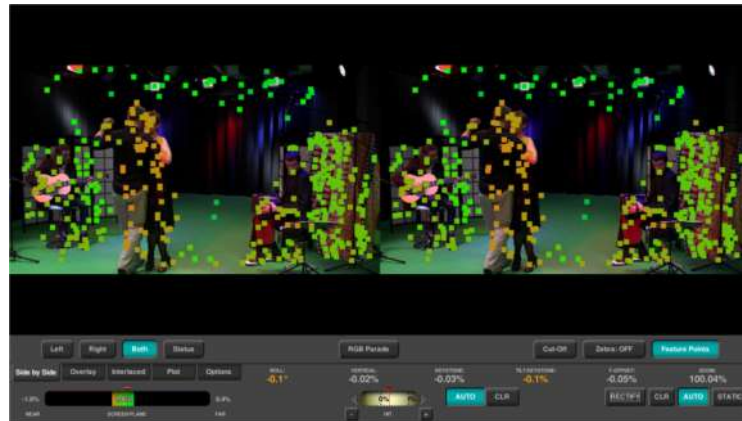


Abbildung 20: Screenshot eines STAN (Fraunhofer HHI)

wertvolle an einem STAN ist, dass er diese ganzen Korrekturen im Livebetrieb vornehmen kann. Das korrigierte Bild wird dann zur Aufzeichnung vom STAN weitergegeben.

6.3 Versuchsteile

Wie aus den vorherigen Ausführungen entnommen werden kann, ist ein stereoskopisches Kamerasystem für jede Szene einzeln zu konfigurieren. Dabei gilt es einige bildqualitätseinschränkende Parameter und Kompromisse zu beachten. Besonders im Nahbereich ist es schwierig, eine optimale Lösung für die stereoskopische Aufzeichnung zu finden. Entweder muss auf große Sensoren verzichtet werden, um eine kleine Stereobasis zu erhalten, oder die Stereobasis kann im Nahbereich nicht entsprechend klein eingestellt werden. Durch den Einsatz eines Spiegelrig sind zwar alle Stereobasen im Nahbereich einstellbar ohne auf große Sensoren verzichten zu müssen, jedoch würden dadurch viele zusätzliche Fehlerquellen eingeräumt werden und die Lichtausbeute stark eingeschränkt.

Lichtfeldkameras sind besonders im Nahbereich geeignet. Daher soll untersucht werden, ob die Möglichkeiten einer Lichtfeldkamera ausreichend Spielraum gewährleisten, um besonders in den Nahbereichen, in denen ein stereoskopisches Kamerasystem Kompromisse fordert, bessere Bildqualitäten liefern zu können.

Im ersten Teil des Versuches wird mit der Lichtfeldkamera gearbeitet. Nach intensiven Vorabgesprächen erwies sich die Durchführung der Untersuchung in den Räumlichkeiten der Firma Raytrix in Kiel als am geeignetsten. Die Software, die zur Auswertung der Lichtfelddaten notwendig ist, wurde als nicht sehr einsteigerfreundlich beschrieben und in der Testversion besteht keine Möglichkeit, Aufnahmen zu speichern. Zur Vermeidung von Fehlern fand vor Ort die Betreuung durch Fachleute statt. Am Dienstag, den

19.05.2015 ab 9:00 Uhr erhielt ich eine Einführung in die Technik und Software. Anschließend stand der gesamte Tag zur Verfügung, um den bis dahin erarbeiteten Versuchsaufbau zu konkretisieren und durchzuführen. Am Mittwoch, den 20.05.2015 bestand die Möglichkeit, abschließende Exporte und Dokumentationen durchzuführen.

Die gewonnenen Daten wurden in einem kompressionsfreiem Format gespeichert. Der zweite Teil des Versuches fand am 27.05.2015 im 3IT (Innovation Center for Immersive Imaging Technologies) des Fraunhofer Heinrich Hertz Institutes in Berlin statt. Dort sollten die Versuche möglichst unter gleichen Bedingungen wiederholt und mit einem Spiegelrig aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungen beider Versuchsteile werden anschließend verglichen und ausgewertet. Nachfolgend werden Vorbereitungen und Durchführung für beide Untersuchungen dargelegt und die Ergebnisse erläutert und ausgewertet.

6.3.1 Versuchsvorbereitung Teil 1

Im Vorfeld war unbekannt, in welchen Formaten die Lichtfelddaten sich für spätere Auswertungen archivieren lassen. Da das Rohformat nicht ohne Weiteres gelesen werden kann, müssen Videosequenzen oder ggf. Bilder aus den Rohdaten gerechnet werden. Bilddaten würden für alle auszuwertenden Parameter genügen, lediglich die Schärfeverlagerung, ist nur in einer Videosequenz beurteilbar.

Des Weiteren war es notwendig, zu dokumentieren, welche Distanzen vom Sensor zu den Objekten und zum Hintergrund bei den Aufnahmen entstehen, um diese im zweiten Teil des Versuchs möglichst gleich aufzubauen. Diese Angaben werden auch benötigt, um später herauszufinden, wie groß die maximale Parallaxe ist.

Folgende Parameter sollen im ersten Teil des Versuchs untersucht werden:

Maximale Parallaxe

Unter Berücksichtigung der lateralen Auflösung einer Lichtfeldkamera wird untersucht, bis zu welcher maximalen Parallaxe stereoskopische Bildaufnahmen in Abhängigkeit der Entfernung erzeugt werden können. Hierzu werden Aufnahmen auf unterschiedliche Entfernungen aufgezeichnet und ausgewertet. Die maximale Entfernung wird dabei vorläufig auf ca. 5 m beschränkt. Aus den aufgezeichneten Daten wird eine

Tiefenkarte generiert und mit einer Ansicht ein 3D-Bild gewonnen. Das erzeugte 3D-Bild wird dann auf die Parallaxe untersucht.

Schärfeverlagerung

Laut den Herstellerangaben von Raytrix ist die R29 in der Lage, bis zu 200 Schärfe-Ebenen zu erzeugen. Dies ist jedoch von der genutzten Optik, der Entfernung der eingestellten Fokusebene und den Distanzen der scharf zu stellenden Objekte abhängig. Rein rechnerisch wäre bei optimalen Bedingungen und einer Bildtiefe von 7 m der Abstand von einer Schärfeebene zur nächsten 3,5 cm - bei kleineren Bildtiefen entsprechend näher. Interessant ist hierbei, wie sich die Schärfe exakt rekonstruieren lässt und ob es möglich ist, eine Schärfeverlagerung im Bereich der Postproduktion vorzunehmen.

Tiefenschärfe

Nach Herstellerangaben kann eine Raytrix-Lichtfeldkamera durch die drei unterschiedlichen Brennweiten der einzelnen Mikrolinsen im Vergleich mit herkömmlichen Kameras eine sechsfache Tiefenschärfe erzeugen. Dies bietet der Postproduktion von stereoskopischen Filmen gestalterisch mehr Flexibilität. Es können in Abhängigkeit von Objektentfernung und genutzter Brennweite unterschiedlich kleine Tiefenschärfen erzeugt werden, jedoch hat sich schon bei der Voruntersuchung mit einer Lytro Illum erwiesen, dass nahezu immer die Möglichkeit besteht, alles scharf zu stellen. Unterschiedliche Schärfe-Ebenen können dann auch mit der Tiefenkarte generiert werden.

Farbdifferenzen zwischen den beiden Teilbildern

Bei stereoskopischen Kamerasystemen ist von theoretischen Differenzen durch Bauleranzen bei Sensoren, Optiken und den jeweiligen Settings der beiden Kameras auszugehen. Durch ein Interview mit Florian Krassow, Technical Supervisor 3IT & CINIQ-Center (Center for Data and Information Intelligence), ließ sich in Erfahrung bringen, dass durch technisches Zubehör wie beispielsweise STAN-Analyzer die Stereokamerasysteme schon sehr gut kalibriert werden können. Eine Lichtfeldkamera produziert zwei Teilbilder durch eine einzige Aufzeichnung. Daher werden keine Farbdifferenzen erwartet.

Vertikaler Versatz

Wie im oberen Absatz schon beschrieben, ist der Faktor von vertikalen Versätzen heutzutage nahezu nicht mehr vorhanden. Sie treten zwar kontinuierlich auf, sind aber durch STAN-Analyzer und Postproduktion derartig gering, dass sie den wenigsten Menschen beim Betrachten der Bildaufnahmen noch Probleme bereiten sollten. Allerdings soll hier zumindest bemerkt werden, dass mit den entsprechenden Algorithmen und dem Einsatz einer Lichtfeldkamera der vertikale Versatz vollkommen ausgeschlossen wird. Dadurch ergibt sich in der Produktion am Set ein erheblicher zeitlicher Vorteil, da keine aufwendigen Anpassungen mehr vorgenommen werden müssen.

Optische Verzerrungen

Optische Verzerrungen existieren überall, wo Linsen und Linsengruppen zum Einsatz kommen - demzufolge auch bei stereoskopischen Kamerasystemen und Lichtfeldkameras. Das Problem der Verzerrungen liegt jedoch ebenfalls bei den Kamerasystemen, bei denen mehrere Optiken für die Teilbilder genutzt werden, da auch hier durch optische Bauleranzen kein Objektiv dem anderen gleicht. Der Vorteil der Lichtfeldkamera ist der Einsatz von nur einer Optik. Die Verzerrungen sind demzufolge in beiden Teilbildern gleich. Die Baugenauigkeit zweier Optiken gleicher Brennweite ist jedoch ebenfalls verschwindend gering. Dennoch soll zur Vollständigkeit untersucht werden, welche ungleichen Verzerrungen bei stereoskopischen Kamerasystemen entstehen können, um daraufhin mit den Bildern der Lichtfeldkamera abgeglichen zu werden.

Helligkeit und Kontrast

In dem Versuch sollen schlechte wie gute Helligkeits- und Kontrastbedingungen einfließen. Aus Vorgesprächen mit Dr. habil. Christian Perwaß ist bereits ersichtlich geworden, dass eine Lichtfeldkamera so wie jedes andere tiefenkartenbasierte Kamerasystem kontrastreiche Szenarien für die Erzeugung von Tiefenkarten benötigt. Dies soll in Form von Über-/Untersteuerung der Kamera geschehen. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass für eine Filmproduktion schon aus ästhetischen Gründen stets versucht wird, einen hohen Kontrast zu erreichen.

6.3.2 Versuchsdurchführung

Es standen eine Raytrix R12 und R8 zur Untersuchung hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung stereoskopischer Filmmaterialien zur Verfügung. Die Raytrix R12 besitzt einen 12 Megapixel (MP) CMOS-Sensor, dessen Einzelbildzellen eine Größe von 5,5

µm erfassen. Die R8 hat einen 8 Megapixel-Sensor. Das Mikrolinsengitter besteht aus drei bis vier unterschiedlichen Brennweiten und jede Mikrolinse deckt 23 Einzelbildzellen des Sensors ab. Beide Kameras erzielen eine laterale Auflösung von 25 % der tatsächlichen Sensorauflösung. R12 und R8 verfügen über einen Global Shutter und verarbeiten intern auf 14 bit Wortbreite. Ausgegeben wird in 8 bit Wortbreite. Die Blende des Mikrolinsengitters ist bei der R8 f/2,8 und bei der R12 f/2,4. Jedoch fertigt Raytrix auch auf individuelle Wünsche andere Festblenden an. Der Signalrauschabstand liegt bei 60 dB und die Grafikprozessor-Einheit ist eine NVIDIA GeForce GTX Titan mit 6GB Ram. Diese Verarbeitungseinheiten sind jedoch nicht in der Kamera integriert, sondern werden durch Übertragung auf einem Computer bereitgestellt. Es können aber auch herkömmliche Computergrafikeinheiten des Herstellers NVIDIA zu Verarbeitung genutzt werden.

Erläuterung der Versuchsszenen

Wie bereits erwähnt, können Filmaufnahmen mit Lichtfeldkameras bis auf Distanzen von 5 m sinnvoll sein. Je näher die Objekte stehen und umso kontrast- und strukturreicher die Objekte im Bild sind, desto besser können Tiefenunterschiede aufgezeichnet werden.

Da die Lichtfeldkamera nicht mobil ist, werden in den Räumlichkeit der Firma mehrere Versuchsszenarien aus verschiedenen Gegenständen aufgebaut. Die Szenarien sollen je nach ausgewählter Brennweite aus mehreren, hintereinander im Raum aufgestellten Objekten bestehen.

Nach Möglichkeit wird eine Makroaufnahme gemacht werden, in der ein bis zwei Gegenstände (z.B. Schraube und Kugelschreiber) auf einer Entfernung von null bis fünf Zentimetern verteilt werden. Hierfür wäre eine weite bis mittlere Brennweite sinnvoll.

Für eine Schärfenverlagerung wird eine Modellbahnschiene der Größe TT (Table Top) vor die Kamera gesetzt und ein Tischtennisball die Schiene entlang gerollt. Dies soll von der Kamera in Video aufgezeichnet und anschließend soll die Schärfeverlagerung bearbeitet werden.

Es wird eine Nahaufnahme angefertigt, bei der ich nach Möglichkeit bis fünf Meter Entfernung auf die Kamera zulaufe. Anschließend wird ebenfalls die Schärfe auf mich eingerichtet und zusätzlich eine stereoskopische Ansicht mit einer Brennweite von 50 mm oder höher generiert. Auch dieser Versuch dient zur Prüfung der Schärfeverlagerung.

Der Versuch wurde an beiden Tagen von Christian Heinze betreut. Zunächst wurde der Versuchsaufbau besprochen. Anschließend bekam ich einen Überblick über die neuste

Software Rxlive 3.10. Dies ist eine neue, im Entwicklungsstatus befindliche Version (im Entwicklungsstatus) der Raytrix-Software zur Ansteuerung, Kalibrierung und Bildausgabebearbeitung der gewonnenen Lichtfeldinformationen von jeglichen Kameras dieser Firma. Die Software war für die geplante Untersuchung nicht geeignet, da viele entscheidende Funktionen noch nicht eingebaut waren. Daher bekam ich die Möglichkeit eine ältere Version RxLive 2.10 zu nutzen, welche mir entscheidend umfangreichere Möglichkeiten bot, stereoskopische Parameter einzustellen und Abspeicherungsprozess zu vereinfachen. Da RxLive 3.10 eine Alpha-Version im Entwicklungsstatus ist, sind noch nicht alle Einstellungsparameter möglich. Zudem sind viele Einstellungsmöglichkeiten, die zur Untersuchung der Parameter gebraucht werden, unnötig für die eigentliche Zielgruppe der Industrie und Forschung, sodass der neuen Version aus Ressourcengründen auch einige Funktionen vorenthalten werden.

Die RxLive 2.10 verfügt weder über einen Videoexport, noch über eine Funktion der Schärfeverlagerung in Videoformaten. Schärfentiefe und Schärfenebene können nur statisch eingestellt werden. Der Export aus den Lichtfeld-Rohdaten (RAW-Daten) erfolgte in PNG-Reihenbildern, die anschließend wieder zu Video zusammengefügt wurden. So war es auch möglich, Schärfeverlagerungen durchzuführen, indem jedes einzelne Bild in der Schärfenebene bei kleiner konstruierter Tiefenschärfe angepasst wurde. Aus diesem Grund sind die Schärfeverlagerungsbeispiele auch sehr kurz, da es enorm viel Zeitaufwand ist, jedes einzelne Frame in der Schärfe zu bestimmen und anschließend zu speichern.

Als Brennweiten standen ein 25 mm-Objektiv für die R8 und ein 50 mm Objektiv für die R12 zur Verfügung. Entfernungen wurden immer ausgehend vom Sensor mit einem Lasermessgerät bzw. bei geringen Distanzen, wie beispielsweise in Szene 3, mit einem Meterband gemessen.

Szene 1: Zulaufen auf die Kamera

Messdaten zum Versuch:	
maximale Distanz zu Kamera	431,8cm
gelaufene Distanz	314,2 cm
minimale Distanz zu Kamera	117,6cm
genutzte Kamera	R12
Auflösung in Pixel	2048 x 1534
Seitenverhältnis	4:3

Blende	f/2,4
Fokusebene	90cm
Brennweite	50mm
Sensor	12MP (APSC)

Tabelle 2: Messdaten Szene 1 (Raytrix)

In diesem Versuch bin ich zu sehen, wie ich eine Strecke von 314,2 cm auf die Kamera zulaufe. Der Versuch dient dazu, die Kamera auf ihre maximal erreichbaren Distanzen zu provozieren und zu ermitteln, welche maximale Stereobasis erreichbar ist. Zusätzlich wird auch an diesem Versuch die Schärfeverlagerung untersucht.



Abbildung 21 [S3D]: Ausschnitt Szene 1 (Raytrix)

Szene 2: Tischtennisball auf Modellbahnschiene

Messdaten zum Versuch 2:	
Maximale Distanz zur Kamera	770cm
Minimale Distanz zur Kamera	558cm
Beginn der Schiene	740cm
Genutzte Kamera	R12
Auflösung in Pixel	2048 x 1534
Seitenverhältnis	04.03.15
Blende	F/2,4
Fokusebene	770cm (Hintergrund)
Brennweite	50mm
Sensor	12MP (APSC)

Tabelle 3: Messdaten Szene 2 (Raytrix)

In diesem Versuch wird eine Modelleisenbahnschiene mit geringer Neigung vor einem gleichmäßig strukturierten Hintergrund aufgebaut. Über diese Schiene wird ein ange- malter Tischtennisball gerollt. Auch mit diesem Versuchsaufbau sollte die Schärfenver- lagerung und die stereoskopische Produktion für die maximal erreichbare Parallaxe im näheren Bereich betrachtet werden. Dabei wurden die Bedingungen für eine Lichtfeld- kamera insofern komfortabel gestaltet, als dass alle Ebenen und Objekte ausreichend Struktur aufwiesen, um eine Tiefenschätzung zu verbessern.

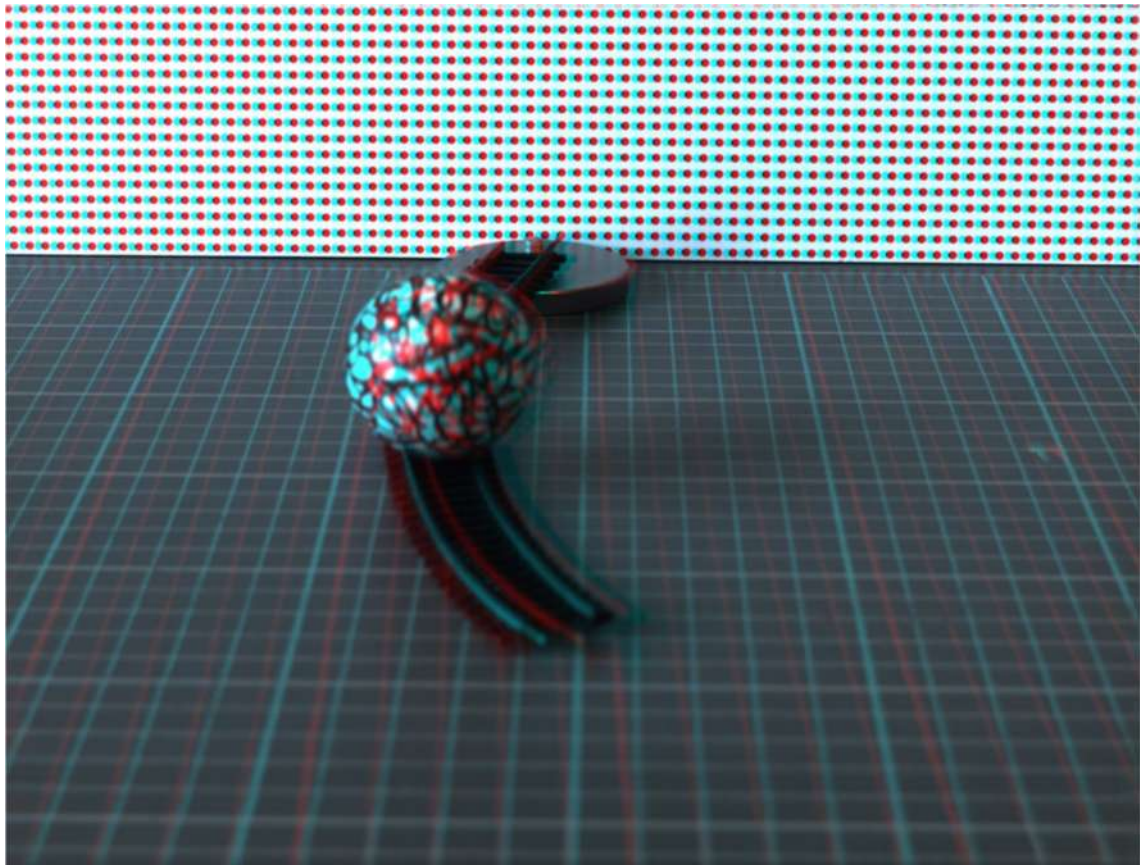


Abbildung 22 [S3D]: Ausschnitt Szene 2 (Raytrix)

Szene 3: Legomännchen

Messdaten zum Versuch 3	
Maximale Distanz zur Kamera	39,5cm
Minimale Distanz zur Kamera	32,5cm
Radius des Legomannkreises	7cm
Genutzte Kamera	R8
Auflösung in Pixel	1920 x 1080
Seitenverhältnis	16:09:00
Blende	F/2,8
Fokusebene	39,5cm

Brennweite	25mm
Sensor	8MP (APSC)

Tabelle 4: Messdaten Szene 3 (Raytrix)

In diesem Versuch sollte die maximale Nähe ausgereizt werden. Für den Versuch wurde eine elektrisch betriebene Drehscheibe aufgestellt, auf der mehrere Legomänner im Kreis aufgestellt wurden und sich nach Inbetriebnahme der Scheibe drehten. In diesem Versuch wurde der Hintergrund weiß belassen, um der Lichtfeldkamera keine Tiefeninformationen bereitzustellen.

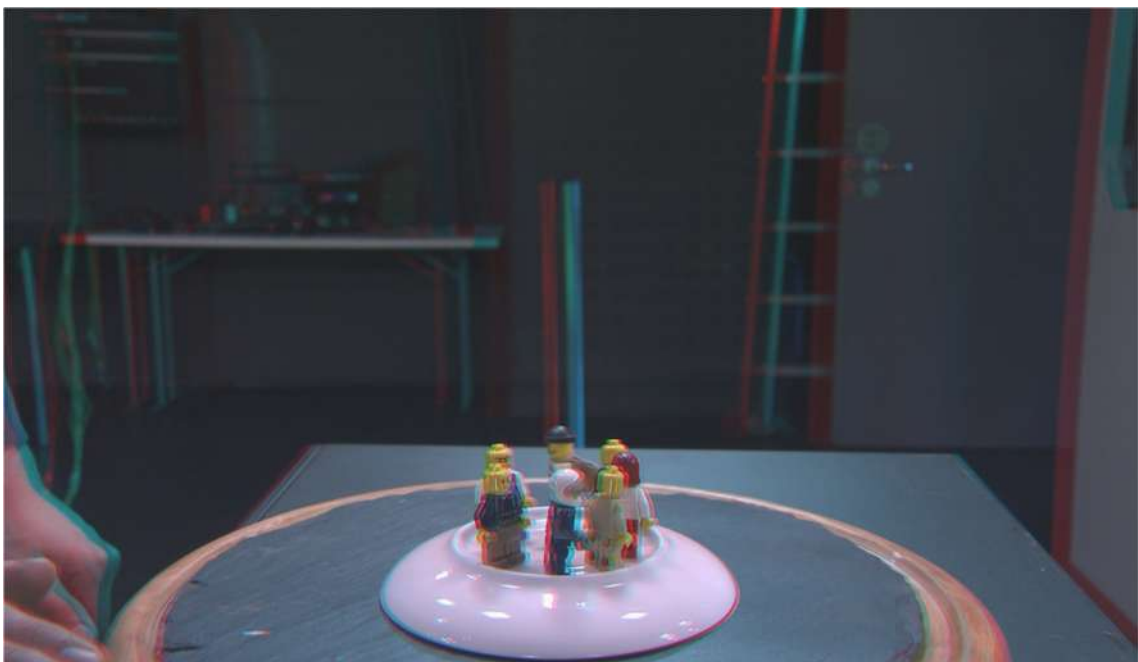


Abbildung 23 [S3D]: Ausschnitt Szene 3 (3IT)

6.3.3 Versuchsvorbereitung Teil 2

Die Untersuchungen des ersten Versuchsteils werden mit Aufnahmen eines stereoskopischen Spiegelrig verglichen. Das Side by Side-Rig wurde aus den Untersuchungen ausgeschlossen, da sich der Schwerpunkt der Untersuchungen auf möglichst nahe Szenarien und folglich kleine Stereobasen richtet. Das Side by Side-Rig würde sich daher in diesen Untersuchungen kaum für einen Vergleich eignen. Es können aber die Resultate des Vergleiches von Spiegelrig und Lichtfeldkamera auch auf ein Side by Side-Rig angewandt werden, wenn die Vor- und Nachteile bekannt sind.

Es bestand im Vorfeld die Überlegung auch das Trifocal-Rig als drittes Vergleichssystem mit heranzuziehen. Die Kamera war jedoch nicht einsatzbereit. Zudem wäre dadurch der zeitliche Rahmen der Untersuchung weit überzogen wurden.

Für die Auswertung beider Versuche ist hier besonders wichtig, die genutzten Stereobasen der Einstellung zu messen, um sie in der Auswertung mit der errechneten Stereobasis der Lichtfeldkamera zu vergleichen. Die Abstandswerte der Versuche werden aus den Dokumentationen des ersten Teils des Versuchs entnommen und nachgebaut. Es ist außerdem für ein Spiegelrig nicht notwendig, dass der Hintergrund Strukturen aufweist, da dieses Kamerasystem nicht mit Tiefenkarten arbeitet. Für Szene 3 steht leider keine elektronisch betriebene Drehscheibe zur Verfügung. Alternativ wurde eine drehbare Kuchenplatte genutzt, auf der eine umgedrehte Kaffee-Untertasse gelegt wurde, um einen der elektronischen Drehscheibe nachempfundenen Radius zu erzeugen.

Folgende Parameter sollen im zweiten Teil des Versuchs betrachtet werden:

Farbdifferenzen der Teilbilder:

Es wird untersucht ob die beiden Teilbilder des Spiegelrig farblich identisch sind, oder es zu Abweichungen kommt.

Schärfe der Teilbilder

Im Gegensatz zur Lichtfeldkamera, welche nur ein Objektiv für beide Teilbilder nutzt, ist an einem stereoskopischen Kamerasystem die Schärfe an beiden Objektiven exakt gleich einzustellen. Jedoch können Bauleranzen der genutzten Objektive auch die Schärfe-Ebene beeinflussen und die Exaktheit reduzieren.

vertikaler Versatz

Der vertikale Versatz wird heute durch STAN-Analyzer korrigiert. Dies geschieht jedoch auf Kosten der Auflösung. Damit soll auch festgehalten werden, welche physischen Versätze ohne den Einsatz digitaler Korrekturtechnik bestehen.

Verkipfung

Die physischen Toleranzen der Verkipfung werden festgehalten und analysiert.

Zoom-Differenzen

Die physischen Toleranzen der Zoom-Differenzen werden festgehalten und analysiert.

6.3.4 Versuchsdurchführung

Blende, Brennweite und Fokusbasis stimmen nicht mit den Einstellungen des ersten Versuches überein. Dies war sehr schwer zu bewerkstelligen, da das Spiegelrig bereits aufgebaut war und die minimale Höhe des Spiegelrigs bei circa 130 cm lag, die Lichtbedingungen aus dem ersten Teil des Versuchs schwer nachzubauen waren und der Hintergrund viel dunkler war als im Versuch mit der Raytrix-Lichtfeldkamera. Im 3IT im Studio ist das Tageslicht absichtlich ausgeschlossen. Jedoch sind diese Parameter für den Versuch nicht relevant, da es lediglich um Differenzen der Teilbilder geht. Für Szene 1 (Zulaufen auf die Kamera) wird eine Stereobasis von 5,5 cm genutzt, für die Szenen 2 (Tischtennisball auf Modellbahnschiene) und 3 (Legomännchen) werden Stereobasen von 0,7 cm genutzt. Die Kameras sind in allen drei Versuchen parallel zueinander ausgerichtet. Zur Synchronisierung der beiden Teilbilder wird zu jedem Beginn der Aufzeichnung ein Synchronimpuls in Form eines Handschlags erzeugt.

Als Aufnahmesystem steht ein Spiegelrig von Stereotec und zwei Kamerabodys von Sony HDC-P1 Power MADFlex zur Verfügung. Die Optiken sind zwei Zoom-Optiken von Fujinon mit einer Brennweite von 7,6 mm bis 137 mm und einer Blende von $f/1,8$ (von 7,6 mm bis 105 mm) und steigende Blende bis $f/2,6$ bei 137 mm⁵⁷. Das Ausrichten der Kamera erfolgt manuell. Eine motorisierte Feinjustage steht für die Ausrichtung nicht zur Verfügung. Für die zeitliche Synchronisierung des Kamerasystems ist ein Genlock* (Bezeichnung für Synchronisationsgeräte in derameratechnik) mit angeschlossen. Zur Hilfestellung, wie gut die Teilbilder aufeinander abgeglichen sind, werden die beiden Bildsignale der Kameras auf einen STAN-Analyzer geschickt, welcher uns die Abweichungen wie Zoomunterschiede, vertikaler Versatz, Key-Stoning, Verkipfung und Parallaxe anzeigt. Anschließend korrigiert der STAN-Analyzer alle nicht hundertprozentig übereinstimmenden Parameter auf Kosten der Auflösung. Je genauer die Justierung des Rig stattgefunden hat, desto besser kann es der STAN-Analyzer korrigieren. Zusätzlich kann das durch die Ausrichtung entstandene Tiefenbudget beurteilt

⁵⁷ Vgl. Fujifilm Value from Innovation: „HAS18x7.6BZD-T5DD, Specifications“. URL: http://www.fujifilmusa.com/products/optical_devices/broadcast-uhd-hd-sd/3d-products/has18x76-bzd-t5dd/#specifications (Stand 27.05.2015)

werden. Die Grenzen des STAN-Analyzers liegen bei unter- bzw. überbelichteten Bildern, in denen keine Konturen oder Vergleichsmerkmale mehr zu erkennen sind, sowie auch in Unschärfen.

Um das Signal aufzuzeichnen, werden die Videosignale für das linke und rechte Teilbild vom Ausgang des STAN-Analyzers zu einem Recorder gesendet und dort separat aufgezeichnet. Demzufolge sind Versätze, Zoomunterschiede und Verkippungen nicht mehr zu analysieren, da der STAN-Analyzer ein korrigiertes Signal ausgibt. Jedoch konnten die Angaben des unkorrigierten Bildes im Programm ausgelesen und dokumentiert werden.

	Szene 1	Szene 2	Szene 3
Vertikaler Versatz in %	-0,1	0,08	-0,01
Verkipfung in Grad	-0,12	0,25	0,13
Tiefenbudget in %	2,5	2,7	3,8
Zoomunterschiede in %	100,3	100,6	98,8

Tabelle 5: Abweichungen der drei Versuchsszenen im 3IT Berlin; gemessen von STAN

Die Aufzeichnung erfolgt ebenfalls in Einzelbildern im Tiff-Format.

6.4 Auswertung der Versuche Teil 1 und Teil 2

Bei einer Stereokamera werden Tiefenunterschiede immer besser, je näher betroffene Objekte am Bildakquisitionssystem stehen. Dagegen entstehen bei der Lichtfeldkamera auf Distanz höhere Tiefenunterschiede. Eine Lichtfeldkamera benötigt eine möglichst kleine Schärfentiefe, um Tiefenschätzungen gut ausführen zu können. Da im Mikrolinsengitter verschiedene Brennweiten vorhanden sind, können unscharfe Bereiche durch Triangulation wieder zurückgerechnet werden. Die Schärfenverlagerung wurde - wie bereits erwähnt - durch Einzelbildabspeicherung durchgeführt. Die Schärfentiefe und die Gradation der Unschärfe wurden einmal eingestellt und bei allen Bildern gleich beibehalten. Die Schärfeveränderung erfolgt lediglich über die Fokusebene, welche immer dem bewegten Objekt im Bild zugeordnet wurde. Die Schärfenverlagerung ist sehr fein einstellbar. Lediglich die Bewegungsunschärfe der einzelnen Frames erschwerte diesen Prozess teilweise. Dies ist aber auch den Lichtbedingungen und

dem entsprechendem Shutter-Einstellungen geschuldet. Bei der Einstellung der Schärfe vor der Aufnahme ist es wichtig, dass die Fokusebene auf dem Hintergrund liegt bzw. auf dem letzten wichtigen Objekt, welches später scharf dargestellt werden soll, da über die Fokusebene hinweg in die Unendlichkeit kaum etwas zurückgerechnet werden kann. Lediglich in die vorderen Ebenen kann die Schärfe rekonstruiert werden. Man spricht von bis zu 200 Ebenen. Helligkeit und Kontrast der einzelnen Objekte im Raum sind essentielle Bedingungen für ein qualitatives Raumbild. Lichtverhältnisse wie auch der Kontrast sind besonders für die Einrichtung der Kamera entscheidend. Wie bei jedem tiefenkartenbasierendem Stereosystem müssen die Tiefenkarten möglichst fehlerfrei sein. Fehler in Tiefenkarten entstehen durch Rauschen und strukturarme Objekte/Bereiche. Dies zeigt das Beispiel in Abbildung 23 und 24.



Abbildung 24: Bild von bemalten und unbemalten Tischtennisball (Raytrix)

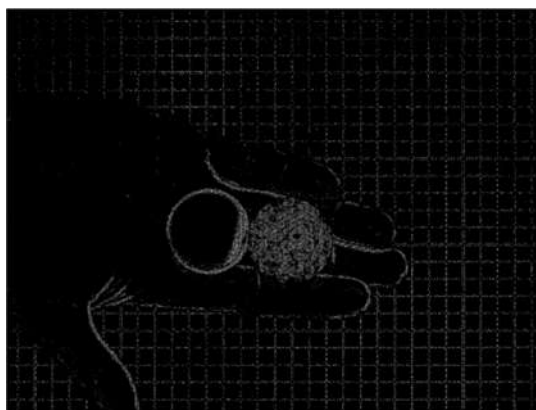


Abbildung 25: Tiefenkarte von Abbildung 21: Der unbemalte Ball ist kaum zu erkennen

Vor der Szene 2 haben wir einen Tischtennisball angemalt und zusätzlich einen zweiten unbemalten Tischtennisball fotografiert, um anhand der Tiefenkarte darzustellen, dass eine Lichtfeldkamera aus dem weißen Ball kaum Struktur entnehmen kann, wohingegen der bemalte Ball ganz klar und deutlich zu erkennen ist. Selbst die Hand, welche Strukturen hat, ist in der Tiefenkarte fast komplett schwarz. Grundsätzlich muss

immer gewährleistet sein, dass alle bildgebenden Objekte ausreichend Struktur und Kontrast aufweisen. Andernfalls können störende Artefakte an Objekträndern oder zu Übergängen in andere Tiefen entstehen. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Generierung zweier Teilbilder nicht zwangsläufig über die Tiefenkartengenerierung geschehen muss. Entsprechend der Anzahl der Mikrolinsen, stehen auch Perspektiven des Motives zur Verfügung. Man könnte also auch ohne Tiefenkarten stereoskopisches Filmmaterial mit einer Lichtfeldkamera erzeugen. In diesem Versuch konnte es nur über Tiefenkarten funktionieren, da die Software nahezu alles aus Tiefenkarten rechnet und dementsprechend auch an deren Qualität geknüpft ist. [ggf. mehrere Ansichten von einem Objekt zeigen]

Für Farbdifferenzen der Teilbilder sind absolut keine Unterschiede zu erkennen. Es gibt minimale Veränderungen in den Perspektiven, welche auf das einfallende Licht zurückzuführen sind. Da sich die Perspektive von einem Teilbild zum anderen verändert, ändert sich auch der Lichteinfall. Grundsätzlich können jedoch mathematisch keine Differenzen bestehen; im Gegenteil: Das Lichtfeld bietet ausreichend Informationen, um jegliche Verzerrungen, Abbildungsfehler, wie chromatische Aberrationen und Farbdifferenzen auszuschließen. Auch alle optischen Verzerrungen werden automatisch aus den Informationen des Lichtfeldes und den Metadaten der genutzten Optik korrigiert. Es können sogar nach entsprechender Kamera-Kalibrierung Messungen im dreidimensionalen Raum vorgenommen werden, welche bis auf Bildzellengröße (also im Mikrometerbereich) genau sind. Für Schärfentiefe, vertikale Versätze und optische Verzerrungen bleiben die im Vorfeld angesetzten Vermutungen bestehen.



Abbildung 26: Beide teilbilder liegen übereinander. Es sind kaum Farbdifferenzen im Histogramm zu erkennen

In dieser Abbildung sind die beiden Teilbilder mit ihren eigenen Histogrammen mit 50 % Transparenz übereinander gelegt. An der Steckdose kann man die Parallaxe gut erkennen. Die Histogramme sind exakt deckungsgleich. Lediglich im rechten Bereich des Gesamt RGB-Signals ist an der oberen Kante eine leichte Differenz zu erkennen, welche auf das unterschiedlich einfallende Licht der beiden Perspektiven zurückzuführen ist.

Es ist deutlich zu erkennen, dass besonders in der perspektivischen Verschiebung und der Schärfen-Tiefen-Generierung starke Artefakte auftreten. Wie schon erwähnt, kann dies durch zu wenig Struktur und Kontrast entstehen. Die Bedingungen für perfekte Aufzeichnungen waren ungünstig. Gravierender jedoch wirken sich die Rechenprozesse aus. Die Berechnung der Perspektive oder auch der Schärfe ist ein enorm rechenaufwändiger Prozess. Raytrix lagert diese Prozesse auf den Grafikchipsatz aus, da diese bekanntlich am schnellsten sind. Da solche Berechnungen nicht maßgeblich für die Anwender solcher Kameras sind, liegt die Priorität der Software auch eher auf der schnellen Berechnung. Hier könnte wahrscheinlich noch viel Qualität gewonnen werden.

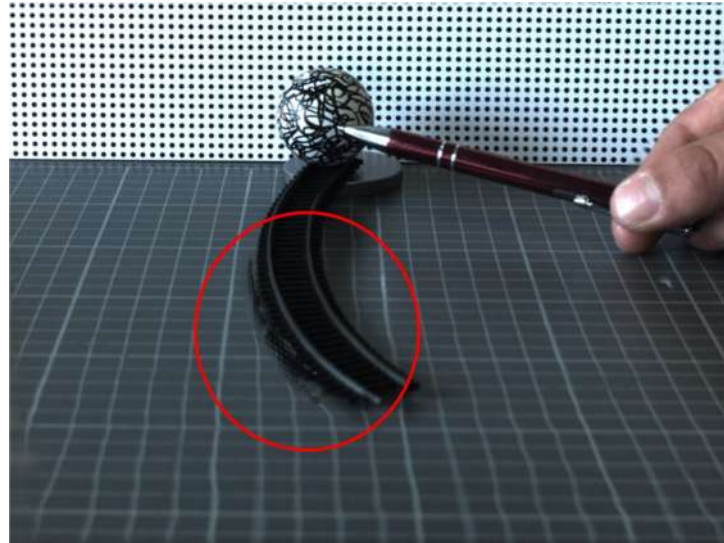


Abbildung 27: Beispiel für Artefakt-Bildung: Links unter der Schiene, als auch die Struktur des Untergrundes, weichen stark von der Originalszenerie ab

Im Versuch Teil 2 ist deutlich geworden, dass ein Spiegelrig sehr aufwändig in der Kalibrierung und Ausrichtung ist. Besonders durch Synchronisation und die Zusatztechnik wie STAN-Analyzer wird viel Feinjustage und Erfahrung benötigt. Trotz der Korrekturtechnik weist das System einige, zwar nicht weiter störende, aber mit technischen und zeitlichen Mehraufwand verbundene Fehler auf. Am gravierendsten sind die Farbunterschiede der Teilbildströme, wie es im Vorfeld schon vermutet wurde. In diesem Bild sind die Helligkeitsverteilungen des RGB-Signals mit 50% Transparenz übereinandergelegt. Die Helligkeitsverteilung von je einem Teilbild wurde mit blau und das andere mit violett gefärbt, um die Unterschiede besser zu verdeutlichen. Durch die Transparenz und das Nicht-Überdecken entsteht eine dritte Farbe, wie das Bild zeigt.

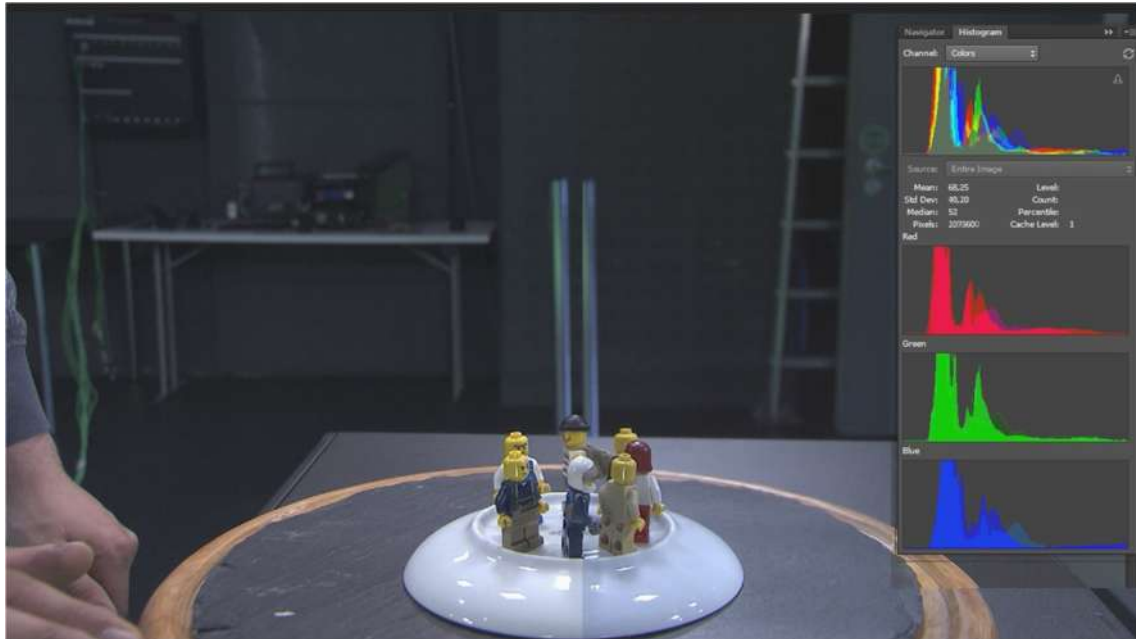


Abbildung 28: Beide Teilbilder (Spiegelrig) im Vergleich zusammengesetzt mit RGB-Abweichung in 50%tiger Transparenz

In Abbildung 26 sind die beide Ansichten zusammengestellt, um die Farbunterschiede



Abbildung 29: Histogramme beider Teilbilder übereinander. Es sind starke Differenzen erkennbar

deutlich zu machen. Bild 27 zeigt die beiden Histogramme der Teilbilder mit Transparenz übereinander gelegt:

Der STAN-Analyzer kann die Farbunterschiede nicht korrigieren. Solche Angleichungsprozesse werden in die Postproduktion verlagert und selbst da kann keine hundertprozentige Gleichheit hergestellt werden. Der Spiegel wirkt wie ein Filter für eine Kamera. Verzerrungen konnten nicht untersucht werden, da weder der STAN-Analyzer noch die Ausgabedateien sinnvolle Ergebnisse darüber liefern. Für die Versuche selbst stimmt die Geometrie beider Teilbilder vollständig überein. Diese wurden aber auch vom STAN-Analyzer angeglichen. Schon allein durch die bestehende Parallaxe der beiden Teilbilder müssten mathematisch unterschiedliche Krümmungen bei einzelnen Objekten entstehen, deren Licht an unterschiedlichen Stellen im Objektiv einfällt. Die

Schärfe zwischen den beiden Teilbildern weist unerwartet hohe Genauigkeiten auf. Lediglich minimale Unterschiede sind zu erkennen, welche aber auch auf Helligkeitsunterschiede zurückgeführt werden könnten. Selbst bei einer Vergrößerung von 960 % konnten für die Teilbilder keine maßgeblichen Unterschiede erkannt werden. Jedoch bestehen grundsätzlich Differenzen in allen Zeitsynchronisationsapparaten. So kann auch bei der Aufzeichnung des Materials keine hundertprozentige Synchronisation gewährleistet sein. Es können Verschiebungen bis zu einem Frame entstehen. Selbiges gilt auch für motorisierte Schärfeverlagerungen und Blendensteuerung.

Die chromatischen Aberrationen werden an dem weißen Tellerrand sehr deutlich – das ist auch in der folgenden Abbildung zu sehen. Zusätzlich ist in der Abbildung eine Verzerrung zu erkennen. Vermutlich entsteht sie durch eine leichte Verdrehung der Kamera. Die einfache Parallaxe sollte hier kein Argument für diese Unstimmigkeit sein, da die Nullparallaxe der Bilder zuvor auf diese Ebene gesetzt wurde. Wechselt man schnell zwischen linkem und rechtem Bild hin und her, erkennt man, dass sich bei der Ansicht von rechts der Tisch nach hinten neigt.

6.5 Vergleich der 3D-Bilder eines stereoskopischen Spiegelrig und einer Lichtfeldkamera

Es werden nachfolgend alle zu vergleichenden Parameter für beide Systeme in einer Tabelle gegenübergestellt.

	Lichtfeldkamera	Spiegelrig
Vertikaler Versatz	Bei einer Lichtfeldkamera können ungewollte Versätze in der vertikale Ausrichtung zu 100 % ausgeschlossen werden.	Das Spiegelrig weist je nach Feinjustage geringe Versätze auf. Eine physisch hundertprozentige Ausrichtung der Kamera ist kaum möglich. Dies ist auf Baulängen zurückzuführen. Jedoch können diese Versätze durch digitale Korrektursysteme wie STAN-Analyzer behoben werden, womit allerdings je nach Versatz auch ein Auflösungsverlust einhergeht.
Optische Verzerrungen	Optische Verzerrungen sind bei der getesteten Lichtfeldkamera nicht vorhanden, da die Soft-	Optische Verzerrungen konnten in meinem Versuch nicht nachgewiesen werden. Jedoch steht fest,

	ware aus den Lichtfeldinformationen und den Metadaten des genutzten Objektivs diese automatisch und verlustfrei entzerren kann.	dass es optische Verzerrungen gibt, die durch den Einsatz der Linsen hervorgerufen werden. Je nach Objektivwahl können diese sogar störend wirken und den Raumeindruck vermindern.
Farbdifferenzen	Da beide Teilbildströme für das linke und rechte Auge aus denselben Bauteilen aufgezeichnet werden, können keine Farbdifferenzen bestehen. Lediglich die Veränderung des Lichteinfalls kann minimale Veränderungen hervorrufen.	Durch den Einsatz des Spiegels, welcher 50 % Licht durchlässt und 50 % reflektiert, entstehen starke Farbdifferenzen zwischen den Teilbildern. Diese sind auch nur schwer und mit viel Aufwand zu korrigieren. Der Spiegel hat den ungewollten Nebeneffekt als Filter zu funktionieren, da verschiedene Lichtwellenlängen stärker reflektiert als absorbiert werden und anders herum.
Tiefenschärfe	Die Tiefenschärfe ist laut Herstellerangaben um das Sechsfache größer, als bei herkömmlichen Kameras, die auf einem Spiegelrig Einsatz finden. Dies macht sich sehr stark bemerkbar. Besonders weil die Tiefenschärfe in der Postproduktion beliebig klein gemacht werden kann. Dies bietet viel gestalterischen Spielraum.	Die Tiefenschärfe ist entsprechend des genutzten Sensors, der genutzten Blende und Brennweite verhältnismäßig klein. Besonders durch den Lichtverlust eines Spiegelring wird man dazu gezwungen offene Blenden zu nutzen und provoziert somit verstärkt eine kleine Tiefenschärfe.
Synchronität	Die Teilbildströme für linkes und rechtes Auge entstehen aus ein und derselben Datei. Es können zwischen den Teilbildströmen in Aufzeichnung, Schärfe und Blende keine Differenzen vorliegen.	Trotz Synchronisationsgeräten für Schärfeverlagerung, Aufzeichnung und Blendensteuerung ist keine hundertprozentige Synchronität gewährleistet. Es ist eher eine Seltenheit, dass eine Synchronität gelingt. Differenzen können bis zu einem Frame Versatz entstehen

Stereobasis	<p>Die Lichtfeldkamera bietet auf einer Entfernung von 4,7 m eine maximale Stereobasis von 44 mm; auf einer Entfernung von 36 cm eine maximale Stereobasis von 2,8 mm. Ebenso gibt es bei der Lichtfeldkamera keinen Mindestabstand im Nahbereich. Man könnte ein Objekt mit einem Abstand < 1 mm scharfstellen und die notwendige Parallaxe entsprechend erzeugen. Eine besondere Stärke liegt auch darin, die Parallaxe vom Maximum bis hin zu keiner Parallaxe nahezu stufenlos im Nachhinein zu generieren. Somit können Fehler bei der Produktion ausgeschlossen und automatisch aus einem geschnittenem Film mehrere Parallaxen-Varianten für unterschiedliche Zielmedien generiert werden. Gleiches gilt für Multiview-Wiedergabegeräte.</p>	<p>Ein Spiegelrig kann angefangen bei 0 mm Stereobasis bis hin zu circa 10 cm Stereobasis erlangen. Es erreicht alle für den Nahbereich notwendigen Stereobasen. Jedoch ist es sehr zeitaufwändig, diese auf eine Szenerie optimal einzurichten. Im Nahbereich wird es für ein Stereo-Kamerasystem schwieriger scharfe Bilder zu erzeugen, da die Objektive einen Mindestabstand zur Fokalebene besitzen.</p>
--------------------	---	---

Tabelle 6: Gegenüberstellung der untersuchten Parameter

In diesem Vergleich wird nicht berücksichtigt, dass eine Lichtfeldkamera neue Fehlerpotentiale aufweist. Eine Lichtfeldkamera, so wie sie getestet wurde, kann unter nicht optimalen Bedingungen sehr schnell störende Artefakte aufweisen, wie die Bilder zeigen. Über diese Fehleranfälligkeit ist keine Aussage zu treffen, da die tatsächlichen Hintergründe nicht bekannt sind. Es müsste weiterhin untersucht werden, worauf die Fehler basieren. Sie könnten ihren Ursprung in den Algorithmen haben, welche überwiegend auf Rechengeschwindigkeit ausgelegt und nicht auf Präzision sind. Andernfalls wäre zu fragen, ob diese Fehler auch in einer nicht-tiefenkartenbasierenden Berechnung auftreten würden. Die Lichtfeldkamera ist in dem untersuchten Zustand ein visuelles Messgerät für die Industrie und auch darauf ausgelegt. Für eine stereoskopische Filmproduktion würden theoretisch relative Tiefenverhältnisse ausreichen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Bildauflösung der stereoskopischen Ka-

mera auf die der Lichtfeldkamera reduziert wurde, da sonst ein Vergleich schwierig geworden wäre. Im Umkehrschluss ergibt sich dadurch die Anforderung an eine Lichtfeldkamera im untersuchten Design, die laterale Auflösung mindestens zu verdreifachen. Technisch wäre die Bewerkstelligung dessen m.E. kein Problem.

Das Side-by-Side Rig (SBS-Rig) wird sich in den Parametern vertikaler Versatz, optische Verzerrungen, Tiefenschärfe und Synchronität wenig vom Spiegelrig unterscheiden. Sicher sind größere Stereobasen erreichbar. Die Farbdifferenzen sollten beim SBS-Rig weitaus geringer ausfallen, da kein Spiegel zum Einsatz kommt. Das Trifocal-Rig hingegen lässt deutlich mehr Postproduktionsaufwand erwarten, da die Satelliten-Kamerabilder von anderen Sensoren als der Hauptkamera entstammen und angeglichen werden müssen. Ebenso ist zu erwarten, dass die Tiefenkarten teils ähnliche Fehler mit sich bringen, wie es bei der Lichtfeldkamera der Fall ist.

7 Schlussbetrachtung

Im Ergebnis des experimentellen Vergleichs der Bildparameter der mit Hilfe einer Lichtfeldkamera und einem Spiegelrig erzeugten 3D-Aufnahmen steht die Aussage, dass sich eine Lichtfeldkamera unter den getesteten Bedingungen nicht in der stereoskopischen Filmproduktion behaupten kann. Die Artefaktbildung durch Teilbilstromgenerierung, Rekonstruieren von Schärfeverlagerungen oder auch direkt im Bild der Lichtfeldkamera durch zu wenige Konturen und Kontraste schränken den Einsatz einer Lichtfeldkamera sehr stark ein. Jedoch ist unter den Versuchsbedingungen zu berücksichtigen, dass viele der entstandenen Abbildungsfehler durch die Berechnung von Algorithmen geschieht, welche weniger auf Präzision ausgelegt sind, als auf Rechengeschwindigkeit. Es müsste analysiert werden, wie qualitativ hochwertig die Ergebnisse mit dem Einsatz von präzisionsorientierten Algorithmen werden. Zusätzlich wäre es relevant, wie gut die Qualität der Teilbilder ist, wenn die Berechnungen nicht über Tiefenkarten geschehen. Es besteht theoretisch die Möglichkeit die Teilbilder über Epipolargeometrie zu errechnen. So sollten Artefakte und andere Abbildungsfehler ebenfalls ausgeschlossen werden können. Sollten sich diese Fehler ausschließen lassen, wäre eine Lichtfeldkamera durchaus in der Lage, sich im Vergleich mit dem Spiegelrig zu behaupten. Denn die Tatsache, dass vertikale Versätze, Farbdifferenzen und Synchronfehler ausgeschlossen sind, bietet bei dem Einsatz von Lichtfeldkameras im stereoskopischen Filmbereich erhebliche qualitative Vorteile. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass sich durch den reduzierten Einrichtungsaufwand zum Spiegelrig zeitliche Vorteile während der Produktion erzielen lassen. Weiterhin ist für den Einsatz einer Lichtfeldkamera eine höhere Auflösung erforderlich. Raytrix produziert bereits hochauflösende Lichtfeldkameras, welche für Kino- und Filmproduktionen in Frage kommen würden. Lediglich die Auslese- und Schreibgeschwindigkeit müsste entsprechend erweitert werden, um eine angemessene Bildwiederholrate zu erzielen.

Ein definitiver Vorteil der Lichtfeldkamera besteht bei der Postproduktion. Man könnte die genutzten Programme für Schnitt so programmieren, dass sich für verschiedene Wiedergabegrößen automatisch die entsprechende Parallaxe einstellt. Besonders für Multiview-Wiedergabegeräte, oder für zukünftige Installationsversuche, wie der genannten KEV, könnten solche Möglichkeiten zu gute kommen.

Das Spiegelrig hat sich entgegen meiner Erwartungen als deutlich fehleranfälliger erwiesen. Besonders gravierend sind die gemessenen Farbdifferenzen. Nach Aussagen von Florian Krassow sind bei Spiegelrigs die Farbunterschiede oftmals so gravierend, dass nach seinen Aussagen der Trend wieder vom Spiegelrig weg geht. Für geringe Stereobasen ist jedoch dahingehend bisher noch keine Alternative vorhanden. Die Lichtfeldkamera hingegen bietet durch ihren Aufbau mit nur einem Sensor und nur einer Linse überhaupt keine Möglichkeit unerwünschte Differenzen in den Teilbildern zu erzeugen. Beide Bilder entstehen aus denselben Bauteilen und sind demnach als identisch zu betrachten. Sollten sich die oben angesprochenen Probleme entsprechend ausschließen, wäre eine Lichtfeldkamera eine sehr gute Alternative zum Spiegelrig.

Literaturverzeichnis

Bomancz, Tycho: „Lichtfelder und Linsen, Seminar Visual Computing“. Universität Stuttgart, Sommersemester 2011

Bochmann, Michael: „Fernkurs zur Vorbereitung auf die amtsärztliche Heilpraktikerprüfung Arbeits- und Lernskript mit naturheilkundlicher Begleittherapie“.

Brandis, Hans-Joachim: „Anatomie und Physiologie. Für Krankenpflegeberufe sowie andere medizinische und pharmazeutische Fachberufe“. 9. Auflage, bearbeitet von Univ.-Professor Dr. Winfried Schöndeberger. Stuttgart, Jena, New York. Urban und Fischer Verlag 1995.

Briede, Marc: „Stereo-3D-Workflow“. FKT-Magazin 11/2011

Buchroithner, Manfred F. und Schenkel, Robert: „Kartographische Echt-3-D-Visualisierung – eine Ergänzung zu flachen Karten. (Herkunft unbekannt)

Buroh, Dennis: „Fourier Slice Photography, Im Rahmen des Computer Vision Seminars (WS 10/11)“. Technische Fakultät der Christian-Albrechts-Universität Kiel, 16.02.2011

Bücken, Rainer: „ITG-Fachausschüsse, Stereoskopie und 3D-TV-Systeme“ Zeitschrift: FKT Ausgabe: 04/2009

Disney Digital Studio Services (Autor nicht angegeben): „Disney, ARRI and Fraunhofer partner to Create Hybrid 3D Camera System: Make Believe is the First Short Movie to Use it“ URL: <http://disneydigitalstudio.com/4177/disney-arri-and-fraunhofer-partner-to-create-hybrid-3d-camera-system-make-believe-is-the-first-short-movie-to-use-it/> (Stand 28.05.2015)

Ditzinger Thomas: „Illusion des Sehens: Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung“ 2. Auflage Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2013

Eickelberg, Stefan: Bericht zur 15. ITG Fachtagung für Elektronische Medien Vorstellung eines Blickpunkt-adaptiven S3D- Postprocessing-Verfahrens Reduktion von Ermüdungserscheinungen bei Stereo-3D; FKT-Magazin 07/2013.

Filmförderungsanstalt - German Federal Film Board: „Kinobesucher von 3D-Filmen 2013 Strukturen und Entwicklungen auf Basis des GfK Panels“, August 2014,

Fujifilm Value from Innovation: „HAS18x7.6BZD-T5DD, Specifications“. URL: http://www.fujifilmusa.com/products/optical_devices/broadcast-uhd-hd-sd/3d-products/has18x76-bzd-t5dd/#specifications (Stand 27.05.2015)

Gerhard Heldmeier und Gerhard Neuweiler: „Vergleichende Tierphysiologie: Neuro- und Sinnesphysiologie“ Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2003.

Gheța, Ioana: „Fusion von Stereo- und Fokusserien“. Universität Karlsruhe (TH)

Giardina, Carolyn: „SMPTE: Disney Exec Howard Lukk Details 'Hybrid 3D' Test Shoot“ URL: <http://www.hollywoodreporter.com/behind-screen/smp-te-disney-exec-howard-lukk-650253> Zeitschrift:

Gutenberg, Johannes: Protokoll zum 4.Kurstag am 30.05.2005 Versuch 4: „Perimetrie“. Universität Mainz (Abgabe der Arbeit: Sommersemester 2005)

Indiecam GS2K, Datenblatt „The distinct aesthetic of the Indiecam is all over the film!“ (Stand: 10.06.2015)

Jäger, Matthias: „3D-Filmen für Einsteiger, Disparität, Horopter, Panumraum“. URL: <http://www.weir3d.de/film/node/33> (Stand: 19.04.2015)

Jockenhövel, Jesko: „Der digitale Film, Narration, Stereoskopie, Filmstil“. Dissertation an der Hochschule für Film und Fernsehen „Konrad Wolf“, Springer-Verlag, 13. November 2013

Karl R. Gegenfurtner, Sebastian Walter und Doris I. Braun: Visuelle Informationsverarbeitung im Gehirn. URL: <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/aka.htm> (Stand: 04.04.2015)

Kavšek, Michael: Zwischenbericht Die Entwicklung des binokularen Sehens im ersten Lebensjahr, Universität Bonn.

Lich, Mathias: „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaft: Visuelle Navigation: Dynamik der Wahrnehmung von Eigenbewegung“ Phillips-Universität Marburg, 2010

Matthias: „Stereo Vision Grundlagen“. Universität Bielefeld, Februar 2005

Michael Faraday: „Thoughts on Ray Vibrations“ URL: <http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wfarad1846.html> (Stand: 3.06.2015)

Ng Reng, Levoy, Marc, etc: „Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera“ Stanford University, Februar 2005

Niesing, Birgit: „Film ab – Brille auf“ Zeitschrift: weiter.vorn. Ausgabe: 03/11

Peter R. und Wellhöfer: „Physiolexikon, Physiotherapie von A-Z“. 2. Auflage, Enke 1990.

Placke, Annika: „Grenzwertbestimmung stereoskopischer Seheindrücke“ Fachhochschule Köln

Quandel, Gudrun: „Hybrid 2D/3D – Stereoinhalte mit Hilfe von Tiefeninformationen generieren“. URL: <https://idw-online.de/de/news526977> Onlineportal: idw - Informationsdienst Wissenschaft) 28.05.2015

Schmidt, Ulrich: „Digitale Film- und Videotechnik, Von den Grundlagen der Film- und Videotechnik bis zu Digital-Video und Digital-Film“. 3., erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010.

Schöneberger, N: „Das Komplexauge und das Sehen bei den Insekten“ Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, 1978

Schweizer Optikerverband (kein Autor angegeben): Das Sehen. URL: <http://www.sov.ch/de/dokumentation/das-sehen> (Stand: 05.04.2015)

Stereo-3D-Info; URL: <http://stereo-3d-info.de/glossar-g.html#geisterbilder> (keine weiteren Angaben vorhanden)

Speck, Thomas: Bionik. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/bionik/8744>

Stoller, Detlef: „Filmtechnik für Hollywood, Neueameratechnologie kann Blickwinkel und Schärfe nachträglich ändern“ URL: <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Optoelektronik/Neue-Kameratechnologie-Blickwinkel-Schaerfe-nachtraeglich-veraendern> (Stand 08.05.2015)

Tanger, Ralf: „3FLEX – Postproduktion mit Tiefe“ Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, (Veröffentlichung unbekannt)

Tauer, Holger: „Stereo 3D: Grundlagen, Technik und Bildgestaltung“. 1. Auflage. Berlin, Schiele & Schön 2010.

Tauer, Holger: „Stereo 3D Rigs“. URL: <http://www.stereo-3d-info.de/stereo-rigs-und-professionelle-3drigs.html> (Stand: 19.04.2015)

The Hollywood Reporter. Veröffentlicht: 22.10.2013 (Stand 22.04.2015)

Wegener, Claudia; Jockenhövel, Jeskou.a.: „3D-Kino – Studien zur Rezeption und Akzeptanz“ , Springer VS, Wiesbaden 2012

Werner, Nachtigal: Bionik - Ein Grenzgebiet zwischen Technik und Biologie (Stand: 03.04.2015)

Wellhöfer, Peter R.: Grundstudium allgemeine Psychologie. 2. Auflage Stuttgart, Enke 1990.

Wesemann, Wolfgang: „Beiträge zur Physiologie des Stereosehens zur Form des Horopters und zur Größe des Pnaumbereichs, Teil 1“. HFA Köln DOZ-Audgabe 04/2000.

Wesermann, Wolfgang: Das Auge – eine Hochleistungskamera (Stand 05.04.2015)

Ylvi: <http://www.fremdwort.de/suchen/woerterbuch/monokularsehen>. (Stand: 13.05.2015)

Ziegler, Mathias: „Lichtfeldaufnahmesystem für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion“ Magazin: FKT, 12/2014

Anlagen

Die folgenden Unterlagen befinden sich auf der beiliegenden DVD::

Dokumente

- Herleitung Formel
- Vorrecherche Umfragebogen
- Vorrecherche Umfrageergebnisse
- Bachelorarbeit_PDF

Dokumentation

- Abbildungen
- Weitere Bilder Versuch

Versuchsaufzeichnungen

- Szene 1_S3D_Raytrix
- Szene 2_S3D_Raytrix
- Szene 3_S3D_Raytrix
- Szene 1_S3D_3IT
- Szene 2_S3D_3IT
- Szene 3_S3D_3IT
- Szene_1_focus_Raytrix
- Szene_2_focus_Raytrix
- Zusatzvideo_S3D_Raytrix

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname